

# **Entwicklung und Evaluierung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei manuellen Kommissioniertätigkeiten**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der  
Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

**M. Eng. Andreas Michael Bächler**

geboren am 10.06.1987 in Singen a.H./Deutschland

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Peter Kurtz
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Hörz
3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz

Tag der Einreichung: 21.02.2017

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26.06.2017

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fakultät Maschinenbau an der Hochschule Esslingen sowie als Doktorand an der Technischen Universität Ilmenau. Gerne möchte ich mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Kurtz, Leiter des Fachgebiets Arbeitswissenschaften der Technischen Universität Ilmenau, für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Die hilfreichen Diskussionen und fachlichen Anregungen haben wesentlich zum Entstehen der Arbeit beigetragen. Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Hörz möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, in einem Forschungsprojekt mitzuarbeiten. Mit seiner Initiative und seinem Tatendrang legte er nicht nur den Grundstein für die Entwicklung von innovativen Assistenzsystemen für leistungsgeminderte Mitarbeiter, sondern treibt diese bis heute mit Leidenschaft maßgeblich voran. Er hat diese Arbeit von Beginn an mit seiner fachlichen Expertise begleitet, mit zahlreichen konstruktiven Diskussionen unterstützt und bei Rückschlägen mit seiner aufbauenden Art und gutem Rat zu neuer Motivation verholfen. Herrn Professor Dr.-Ing. Georg Krüll danke ich für die dauerhaften fachlichen Anregungen und Denkanstöße sowie die organisatorische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, die mich durch Diskussionen und im konstruktiven Austausch unterstützt haben, gebührt mein herzlichster Dank. Hierbei sind besonders zu erwähnen: Sven Autenrieth, Liane Bächler, Björn Böhmert, Frank Wunderlich, Manuel Kölz und Daniel Heybach.

Mein großer Dank gilt allen Personen, Unternehmen und Einrichtungen, die mich im Rahmen der Entwicklung und Realisierung des Assistenzsystems sowie den anschließenden empirischen Evaluierungen unterstützt haben. Des Weiteren möchte ich mich besonders bei Herrn Fuchs, Herrn Schurig und Herrn Zampolli von der Fa. Bessey für die Bereitstellung von realen Kommissioniergütern, bei Herrn Sieber und Herrn Bader von der Fa. Schnaithmann für die Unterstützung bei der Auslegung und Umsetzung des Rahmengestells sowie bei Herrn Guth und Herrn Raschhofer von der Gemeinnützigen Wohn- und Werkstätten GmbH (GWW) für die Ermöglichung sowie die Unterstützung bei der Durchführung der zahlreichen Evaluierungen bedanken.

Zudem danke ich allen Studierenden, welche ich in zahlreichen Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten betreuen durfte und durch deren Vorarbeit einige Inhalte dieser Schrift entstanden sind.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern, die mir viele Möglichkeiten eröffnet und mich stets liebevoll auf meinem Lebens- und Bildungsweg unterstützt haben. Ebenso möchte ich meinen Schwiegereltern für die selbstlose Unterstützung meiner Familie während der Erstellungsphase dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Frau Liane, die mir über die komplette Zeit dieser Arbeit den Rücken frei hielt, bei der ich unsere Kinder in allerbesten Händen wusste, die mich in Zeiten der Frustration ermutigte und die mit viel Verständnis und mancherlei Verzicht wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Diese Arbeit widme ich meinen beiden Kindern Linea Sofie und Paul Constantin, die mich mit mancherlei Entbehrung auf dem teilweise steinigen Weg zur Erstellung dieser Arbeit begleitet und mich stets an die wichtigsten Dinge in diesem Leben erinnert haben. Ihr zwei seid das Größte und Schönste auf dieser Welt für mich.

## **Kurzzusammenfassung**

Vor dem Hintergrund der aktuellen Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts verstärken sich auch die Anforderungen an Werkstätten für behinderte Menschen. Insbesondere im komplexen intralogistischen Tätigkeitsfeld der manuellen Kommissionierung werden derzeit sowohl auf dem ersten Arbeitsmarkt als auch in den Werkstätten kaum leistungsgeminderte Mitarbeiter eingesetzt. In diesem Zusammenhang stellen informationstechnische und kognitive Assistenzsysteme einen zukunftssträchtigen und erfolgsversprechenden Ansatz zur Anleitung, Unterstützung und Kontrolle von manuellen Industrieprozessen dar.

Den Weg zu einem solchen System geht diese Arbeit: von der nutzerzentrierten Entwicklung über die prototypische Umsetzung bis zur praktischen Evaluierung eines funktionsfähigen und ergonomischen Assistenzsystems zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung. Das ist zugleich ein wichtiger Beitrag zur Ermöglichung der Teilhabe an Arbeit sowie der daraus resultierenden Förderung der Persönlichkeit von Menschen mit Behinderung und eine Antwort auf die vielfältigen und weitersteigenden Anforderungen an Werkstätten.

Darüber hinaus soll der im Zuge der vorliegenden Arbeit umgesetzte Entwicklungsprozess mit seiner Vorgehensweise und Struktur als konzeptionelle Vorlage für die aufgabenorientierte und nutzergerechte Gestaltung von weiteren Assistenzsystemen in der industriellen Anwendung dienen, wie z.B. bei der Montage oder der Verdrahtung von Schalt- und Steuerungsanlagen.

Die Arbeit setzt sich zu Beginn mit aktuellen technischen, politischen und institutionsspezifischen Rahmenbedingungen auseinander und betrachtet diese hinsichtlich der Nutzergruppe der leistungsgeminderten Mitarbeiter. Auf Grundlage einer Analyse des Arbeitsprozesses und der Nutzergruppe werden Anforderungsprofile von Seiten des Prozesses, der zukünftigen Nutzer und der Technik erstellt. Daraus lassen sich Zielsetzungen für die Konzeption und Entwicklung des nutzerzentrierten Assistenzsystems ableiten und der Kommissionierprozess spezifizieren. Im Nachgang wird die hardware- und softwareseitige Konzeption und Entwicklung der einzelnen Funktionseinheiten und des Anleitungssystems erläutert sowie der Aufbau und die Funktionsweise dargestellt. Abschließend erfolgt die Anwendung und detaillierte Evaluierung der realisierten Systemlösung.

## **Abstract**

Against the backdrop of current challenges in the living and working environment of the 21st century, the demands placed on sheltered workshops are also intensifying. Particularly in the complex intralogistics field of manual order picking, there are hardly any employees with disabilities working either in the first labor market or in sheltered workshops. In this context, information technology and cognitive assistance systems represent a future-oriented and promising approach to the guidance, support and control of manual industrial processes.

For this reason, the central goal of this dissertation is to describe the user-centered development, prototypical implementation and practical evaluation of a functional and ergonomic assistance system for the support of people with disabilities in manual order picking processes. At the same time, this is an important contribution to enabling participation in work as well as encouraging the development of the personality of people with disabilities; it is also a response to the diverse and increasing demands placed on sheltered workshops.

In addition, the development process, which was implemented in the course of the present work, is intended to serve as a conceptual template for the task-oriented and user-friendly design and development of further assistance systems in industrial applications, such as the assembly or wiring of switchgear and control systems.

At the beginning, the present work deals with current technical, political and institution-specific framework conditions and considers these with regard to the user group of employees with disabilities. On the basis of an analysis of the work process and the user group, requirement profiles are created, taking into account the process, the future users and the technology. From this, objectives for the design and development of the user-centered assistance system can be derived and the picking process specified. Subsequently, the hardware and software development of the single functional units and the guidance system are explained, and their structure and the operating principles presented. Finally, the application is implemented and a detailed evaluation of the implemented system solution is carried out.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzzusammenfassung .....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Motivation.....	4
1.3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit.....	5
<b>2 Grundlagen zur Entwicklung eines Assistenzsystems für Kommissionierprozesse .....</b>	<b>7</b>
2.1 Kommissionierung .....	7
2.1.1 Begriffe und Bedeutung der Kommissionierung .....	7
2.1.2 Aufbau von Kommissioniersystemen .....	10
2.1.3 Integration der Kommissionierung in Materialflusssystemen .....	12
2.1.4 Grundprinzipien der Kommissionierung.....	13
2.1.5 Technische Funktionselemente von Kommissioniersystemen.....	14
2.2 Der Mensch in der Kommissionierung.....	15
2.2.1 Unersetzlichkeit des Menschen in der Kommissionierung .....	16
2.2.2 Ergonomie in der Kommissionierung .....	17
2.3 Menschen mit Behinderung.....	20
2.3.1 Internationale und nationale Klassifikation des Behinderungsbegriffes.....	20
2.3.2 Nutzergruppe des beschriebenen Assistenzsystems: Menschen mit geistiger Behinderung .....	22
2.3.3 Gesetzliche Grundlagen zur Teilhabe an Arbeit von Menschen mit Behinderung.....	23
2.3.4 Werkstatt für behinderte Menschen.....	24
2.3.5 Bedeutung und Funktion von Teilhabe an Arbeit für Menschen mit Behinderung ....	25
2.3.6 Forschung im Kontext von Menschen mit geistiger Behinderung .....	26
2.4 Assistenzsysteme .....	27
2.4.1 Begriffe und Anwendungen.....	27
2.4.2 Eingrenzung verschiedener Assistenzarten in manuellen Kommissioniersystemen...	27
2.5 Nutzerzentrierte Entwicklung .....	28

<b>3</b>	<b>Stand der Erkenntnisse zur Informationsbereitstellung und Kontrolle im Bereich der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung.....</b>	<b>30</b>
3.1	Stand der Technik zur Informationsbereitstellung und Kontrolle .....	30
3.1.1	Kommissionierliste .....	30
3.1.2	Pick-by-Light .....	31
3.1.3	Mobile Terminals .....	31
3.1.4	Pick-by-Voice .....	32
3.2	Neuartige Ansätze der informationstechnischen und kognitiven Assistenz .....	33
3.2.1	Pick-by-Point .....	33
3.2.2	Pick-by-Beamer .....	34
3.2.3	Pick-by-Watch .....	34
3.2.4	Pick-by-Vision .....	35
3.3	Gegenüberstellung der vorgestellten Person-zur-Ware-Verfahren .....	36
3.4	Stand der Technik und Forschung im Bereich von Unterstützungstechnologien für Menschen mit geistiger Behinderung zur Teilhabe an Arbeit .....	38
3.5	Zwischenfazit .....	39
<b>4</b>	<b>Analyse des Arbeitsprozesses und der Nutzergruppe.....</b>	<b>40</b>
4.1	Analyse eines Kommissionierprozesses innerhalb der WfbM .....	40
4.1.1	Hardwareaufbau .....	40
4.1.2	Ablauf eines Kommissioniervorgangs .....	40
4.2	Leistungsprofilanalyse von leistungsgeminderten Mitarbeitern innerhalb der WfbM .....	41
4.2.1	Kategorisierung und Tätigkeitsgebiete der leistungsgeminderten Mitarbeiter .....	41
4.2.2	Empirische Untersuchung zur Erhebung der Nutzerfähigkeiten und -bedürfnisse.....	43
4.3	Ableitung von Handlungsfeldern .....	46
<b>5</b>	<b>Spezifikation der Anforderungen an ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für manuelle Kommissionierprozesse .....</b>	<b>48</b>
5.1	Anforderungsprofil von Seiten des Kommissionierprozesses .....	48
5.1.1	Qualitative Kriterien .....	49
5.1.2	Quantitative Kriterien .....	49
5.2	Anforderungsprofil von Seiten der leistungsgeminderten Mitarbeiter .....	51
5.2.1	Anforderungen an die Arbeitsgestaltung für leistungsgeminderte Mitarbeiter .....	51
5.2.2	Anforderungen an die Informationsbereitstellung .....	54
5.2.3	Anforderungen an die Kontrollfunktion .....	55
5.3	Anforderungsprofil von Seiten der Technik .....	56
5.3.1	Hardwareanforderungen .....	56

5.3.2	Softwareanforderungen .....	58
5.4	Zielsetzungen für ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für leistungsgeminderte Mitarbeiter bei manuellen Kommissioniertätigkeiten .....	59
<b>6</b>	<b>Konzeption und Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für Kommissionierprozesse .....</b>	<b>60</b>
6.1	Spezifikation des ausgewählten Kommissionierprozesses .....	60
6.2	Entwicklung und Auswahl der Funktionseinheiten des Assistenzsystems .....	64
6.2.1	Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur visuellen Informationsbereitstellung .....	64
6.2.2	Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle von Entnahme- und Ablageprozessen .....	66
6.2.3	Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle der Menge und Identität .....	67
6.3	Entwicklung von Hardwarekonzepten und Auswahl der umzusetzenden Variante .....	68
6.3.1	Konzept 1: Systemlösung mit statischer Assistenzeinheit .....	68
6.3.2	Konzept 2: Systemlösung mit einachsig beweglicher Assistenzeinheit .....	69
6.3.3	Konzept 3: Systemlösung mit zweiachsig beweglicher Assistenzeinheit .....	70
6.3.4	Bewertung der Hardwarekonzepte .....	71
6.3.5	Simulation des ausgewählten Aufbaus mit Hilfe eines CAD-Modells .....	75
6.3.6	Testaufbau in Laborumgebung .....	76
6.4	Auswahl der technischen Funktionselemente .....	77
6.4.1	Rahmengestell zur Verbindung von Kommissionierwagen und Durchlaufregallager .....	77
6.4.2	Linearführungen .....	77
6.4.3	Wegmesssystem .....	79
6.4.4	Kopplungsfunktion zwischen Kommissionierwagen und Rahmengestell .....	80
6.4.5	Höhenverstellung der Waage .....	82
6.4.6	Sonstige Funktionselemente .....	83
6.5	Konzeption und Gestaltung des Bedien- und Anleitungssystems .....	84
6.5.1	Analyse der für den Anleitungsprozess darzustellenden Informationen .....	84
6.5.2	Entwicklung eines Funktionsmodells für die Informationsübertragung zwischen Assistenzsystem und Kommissionierer bei projizierten Anleitungen .....	85
6.5.3	Empirische Untersuchungen zur Entwicklung eines Anleitungssystems für die manuelle PzW-Kommissionierung mit leistungsgeminderten Mitarbeitern .....	86
6.5.4	Darstellung der bestbewerteten Kommissionieranleitung in der Anfängerstufe .....	89

<b>7</b>	<b>Aufbau und Realisierung eines Prototyps .....</b>	<b>94</b>
7.1	Systemübersicht und Aufbau .....	94
7.2	Funktionsweise und Prozessablauf .....	95
<b>8</b>	<b>Vorbereitung, Aufbau und Durchführung der Evaluierungen .....</b>	<b>97</b>
8.1	Vorbereitung der Evaluierungen.....	97
8.1.1	Methodische Vorgehensweise .....	97
8.1.2	Studiendesign .....	99
8.1.3	Operationalisierung des Nutzens und Ableitung von Evaluationskriterien.....	102
8.1.4	Evaluierungsziele .....	104
8.1.5	Evaluierungen mit leistungsgeminderten Menschen.....	106
8.1.6	Studienunterlagen .....	108
8.1.7	Umsetzung forschungsethischer Prinzipien .....	110
8.2	Versuchsaufbau .....	112
8.2.1	Lageraufbau und -umgebung .....	112
8.2.2	Lagerortkennzeichnung .....	114
8.2.3	Artikelstruktur.....	115
8.2.4	Arten der Informationsbereitstellung .....	116
8.3	Durchführung der Evaluierungen.....	119
<b>9</b>	<b>Evaluierungsergebnisse .....</b>	<b>123</b>
9.1	Vorgehensweise zur statistischen Auswertung der Kommissionierstudien.....	123
9.2	Vorstudien zur Ableitung von Gestaltungs- und Optimierungspotenzialen.....	127
9.2.1	Erste Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen .....	127
9.2.2	Zweite Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	131
9.2.3	Ableitung von Gestaltungs- und Optimierungspotenzialen .....	134
9.3	Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	136
9.3.1	Versuchsteilnehmer.....	136
9.3.2	Ergebnisdarstellung .....	137
9.3.3	Diskussion der Ergebnisse .....	146
9.4	Abschließende Betrachtung der Evaluierungen .....	148
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>150</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>152</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>165</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts (vgl. Spanner-Ulmer 2012) .....	1
Abbildung 2:	Spannungsfeld von Werkstätten für behinderte Menschen durch aktuelle Anforderungen .....	5
Abbildung 3:	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	6
Abbildung 4:	Bedeutung der Kommissionierkosten (vgl. Nave 2009) .....	8
Abbildung 5:	Zusammensetzung der Kommissionierzeit.....	9
Abbildung 6:	Anteile der Fehlerarten in den Unternehmen (vgl. Lolling 2003) .....	9
Abbildung 7:	Grafische Darstellung eines Kommissioniersystems als Arbeitssystem (vgl. Schlick et al. 2010; DIN EN ISO 6385) .....	10
Abbildung 8:	Die Kommissionierung als Bestandteil der unternehmensinternen Logistik (vgl. Jünemann 1989; Menk 1999) .....	13
Abbildung 9:	Person-zur-Ware- Kommissionierung .....	13
Abbildung 10:	Vergleich der Funktionen von Mensch und Maschine (vgl. Lanc 1975; Schmauder und Spanner-Ulmer 2014) .....	16
Abbildung 11:	Mechanisches Modell der Belastung und Beanspruchung (vgl. Schmauder und Spanner-Ulmer 2014; Hoppel et al. 2011).....	18
Abbildung 12:	Der Leistungsbegriff in der Ergonomie (vgl. Schmidtke und Bernotat 1993).....	18
Abbildung 13:	Leistungs- und fehlerbeeinflussende Faktoren in der Kommissionierung (vgl. Menk 1999) .....	19
Abbildung 14:	Informationsübertragung im Mensch-Maschine-System (der Kommissionierung) (vgl. Schlick et al. 2010; Lolling 2003).....	20
Abbildung 15:	Historische Wandlung der Forschungsperspektiven (vgl. Terfloth und Janz 2009) ....	26
Abbildung 16:	Informationstechnische (und kognitive) Assistenz beim Entnahmevorgang (vgl. Richter 2015) .....	28
Abbildung 17:	Nutzerzentrierte Entwicklung eines Mensch-Maschine-Systems (vgl. Hennecke 2016) .....	29
Abbildung 18:	Beispiel einer Kommissionierliste.....	30
Abbildung 19:	Beispiel einer Pick-by- und Put-to-Light Fachanzeige.....	31
Abbildung 20:	Mobiles Datenterminal als handgehaltene Ausführung mit integriertem Scanner auf einer Docking-Station .....	32
Abbildung 21:	Sprachgesteuerte Kommissioniererführung per Pick-by-Voice.....	32
Abbildung 22:	Pick-Radar als Zugriffskontrolle (LUCA GmbH 2016) .....	33
Abbildung 23:	Pick-by-Point System (LUCA GmbH 2016) .....	33
Abbildung 24:	Pick-by-Beamer im Einsatz (SAFELOG GmbH 2016) .....	34
Abbildung 25:	Darstellung von Zusatzinformationen per Bildschirm (SAFELOG GmbH 2016).....	34
Abbildung 26:	Pick-by-Watch mit integrierter Entnahmekontrolle (Reichel 2016).....	34
Abbildung 27:	PzW-Kommissionierung mit Pick-by-Vision (Ubimax GmbH 2016b) .....	35
Abbildung 28:	Derzeitiger Kommissionieraufbau (links) und Prozessablauf für die Kommissionierung (rechts) in der WfbM .....	41
Abbildung 29:	Der Einsatz eines Assistenzsystems als Bindeglied zwischen den leistungsgeminderten Mitarbeitern (Arbeitspersonen), dem vorhandenen Hardwareaufbau (Arbeitsmittel) und dem Kommissionierprozess (Arbeitsaufgabe).....	47

Abbildung 30:	Anforderungen an ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für manuelle Kommissionierprozesse .....	48
Abbildung 31:	Materialflusskonzept mittels Wechselwagen: Kommissionierwagen in abgedocktem Zustand (links), Kommissionierwagen in angedockten Zustand (rechts) .....	57
Abbildung 32:	Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung kombiniert mit dem semiotischen Modell (vgl. Schlick et al. 2010) .....	59
Abbildung 33:	Durchlaufregallager und Kommissionierwagen .....	60
Abbildung 34:	Betrachteter Kommissioniervorgang mit drei Kernprozessen .....	63
Abbildung 35:	Ausgewählte Funktionseinheit zur Informationsbereitstellung: Projektor: Optoma W 306 ST .....	65
Abbildung 36:	Ausgewählte Funktionseinheit zur Kontrolle von Entnahme- und Ablageprozessen: Microsoft Kinect .....	66
Abbildung 37:	Ausgewählte Funktionseinheit zur Kontrolle der Menge und Identität: Bosche Zählwaage CS 60000 .....	67
Abbildung 38:	Konzept 1: Statische Assistenzeinheit .....	68
Abbildung 39:	Konzept 2: Einachsig geführte Assistenzeinheit .....	69
Abbildung 40:	Konzept 3: Zweiachsig bewegliche Assistenzeinheit .....	70
Abbildung 41:	Simulation des Hardwareaufbaus mit den Projektions- und Erfassungsräumen der beiden Kinects (grüne und rote Pyramide) und Projektoren (orangefarbene und pinke Pyramide).....	75
Abbildung 42:	Testaufbau in Laborumgebung .....	76
Abbildung 43:	RGB- und Tiefenbild der Kinect auf Seite des Durchlaufregallagers .....	76
Abbildung 44:	Gängige Technologien für lineare Längen- oder Wegmessung: Magnetisches Messsystem (links), Seilzugsensor (Mitte), Messradsystem (rechts) (Fritz Kübler GmbH).....	79
Abbildung 45:	Drei verschiedene Kopplungsprinzipien .....	81
Abbildung 46:	Kopplungseinheit des Rahmengestells .....	82
Abbildung 47:	Höhenverstellung der Waage .....	83
Abbildung 48:	Abfolge der sieben Anleitungsschritte in der Draufsicht des Gesamtsystems.....	85
Abbildung 49:	Funktionsmodell der Informationsübertragung zwischen Kommissionierer und Assistenzsystem durch Projektion .....	86
Abbildung 50:	Einfluss verschiedener Anleitungsorten auf die kognitive Beanspruchung der Nutzer, bezogen auf den Erfahrungsgrad.....	88
Abbildung 51:	Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Ankoppelprozesses auf dem Touchscreen .....	90
Abbildung 52:	Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Verschiebeprozesses auf dem Touchscreen.....	90
Abbildung 53:	Richtungspfeil des Verschiebeprozesses .....	90
Abbildung 54:	Navigation des Verschiebeprozesses durch vier projizierte Richtungspfeile .....	91
Abbildung 55:	Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Wiegeprozesses auf dem Touchscreen .....	92
Abbildung 56:	Lichtsignale der projizierten Eckleisten als Positionierungshilfe für den Wiegeprozess .....	93
Abbildung 57:	Grün blinkendes Lichtsignal zur Anzeige des Ablageortes (links), Rot blinkendes Lichtsignal als Fehlerrückmeldung (rechts), jeweils für alle drei Anleitungsstufen ....	93

Abbildung 58:	Übersicht der wichtigsten Baugruppen und Funktionseinheiten des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse .....	94
Abbildung 59:	Hardwareaufbau mit allen wichtigen Bestandteilen des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse .....	95
Abbildung 60:	Projizierte Lichtsignale zur Anleitung der Verschiebe-, Entnahme- und Ablageprozesse .....	96
Abbildung 61:	Auswahl des Studiendesigns.....	99
Abbildung 62:	Baumdiagramm der Systemreihenfolgen.....	100
Abbildung 63:	Evaluierungs- und Entwicklungsverlauf.....	102
Abbildung 64:	Zusammenhang zwischen der Gebrauchstauglichkeit, der Operationalisierung des Nutzens sowie den abgeleiteten Messvariablen für die Evaluierung von Kommissioniersystemen (vgl. Pataki et al. 2005) .....	104
Abbildung 65:	Auszug des modifizierten NASA-TLX für das Item "Geistige Anforderung" .....	109
Abbildung 66:	Lageraufbau in Laborumgebung.....	114
Abbildung 67:	Klassifizierung der Lagerortkennzeichnung (links), Umsetzung der Lagerortkennzeichnung mittels Kunststoffclips (rechts) .....	114
Abbildung 68:	Exemplarische Kanban-Karte zur KLT-Kennzeichnung .....	115
Abbildung 69:	Experimenteller Aufbau des Pick-by-Paper Systems .....	116
Abbildung 70:	Experimenteller Aufbau des Pick-by-Light-Systems .....	117
Abbildung 71:	Experimenteller Aufbau des Pick-by-Display-Systems .....	117
Abbildung 72:	Experimenteller Aufbau des Pick-by-Voice-Systems .....	118
Abbildung 73:	Experimenteller Aufbau des Pick-by-Projection-Systems .....	119
Abbildung 74:	Übersicht des Versuchsablaufs der drei Evaluierungen des Gesamtsystems .....	120
Abbildung 75:	Versuchsdurchführung des Kommissionierprozesses .....	121
Abbildung 76:	Ausfüllen der Fragebögen mit Unterstützung durch einen Versuchsbetreuer .....	121
Abbildung 77:	Vorgehensweise für die statistische Auswertung der Kommissionierstudien .....	126
Abbildung 78:	Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der Kommissionierzeit der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a) .....	128
Abbildung 79:	Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der Kommissionierfehlerrate der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a) .....	129
Abbildung 80:	Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des NASA-TLX der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a) .....	130
Abbildung 81:	Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der Kommissionierzeit der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b) .....	132
Abbildung 82:	Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der Kommissionierfehlerrate der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b) .....	133
Abbildung 83:	Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des modifizierten NASA-TLX der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b) .....	133

Abbildung 84:	Die Ausführung des Pick-by-Projection-Systems mit einer Videoanleitung auf dem Touchscreen (links) und die Ausführung des Pick-by-Projection-Systems in der zweiten Vorstudie mit projizierter Anleitung (rechts).....	135
Abbildung 85:	Box-Whisker-Plot der Kommissionierzeiten für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei N= 6 Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei N= 21 Versuchsteilnehmern (rechts) .....	138
Abbildung 86:	Box-Whisker-Plot der Kommissionierfehlerrate für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei N= 6 Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei N= 21 Versuchsteilnehmern (rechts) .....	140
Abbildung 87:	Box-Whisker-Plot der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des modifizierten NASA-TLX für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei N= 6 Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei N= 21 Versuchsteilnehmern (rechts) .....	143
Abbildung 88:	Entwicklungsverlauf für die nutzerzentrierte Gestaltung von Assistenzsystemen in der industriellen Anwendung.....	151
Abbildung 89:	Ablauf eines konventionellen Kommissionierprozesses nach der Person-zur-Ware-Methode im industriellen Umfeld (vgl. Richter 2015; Wölflé 2014) .....	165



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung der gängigsten Verfahren zur Kommissionierführung und -kontrolle (in Anlehnung an Haberl 2009).....	37
Tabelle 2:	Kreuztabelle Behinderungsart und erwarteter Profit durch das Assistenzsystem (N= 78) .....	44
Tabelle 3:	Spezifizierung des zu entwickelnden Kommissioniersystems mit Hilfe eines morphologischen Kastens (vgl. VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1) .....	62
Tabelle 4:	Vor- und Nachteile der statischen Assistenzeinheit .....	68
Tabelle 5:	Vor- und Nachteile der einachsige geführten Assistenzeinheit .....	69
Tabelle 6:	Vor- und Nachteile der mobilen Assistenzeinheit.....	70
Tabelle 7:	Bewertungskriterien mit Erfüllungsgrad und zugehöriger Erläuterung.....	72
Tabelle 8:	Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Bewertungskriterien .....	72
Tabelle 9:	Bewertungsschema des paarweisen Vergleichs .....	73
Tabelle 10:	Nutzwertanalyse der drei Hardwarekonzepte.....	73
Tabelle 11:	Grobabschätzung der Material- und Technikkosten der drei Hardwarekonzepte für einen Laboraufbau .....	74
Tabelle 12:	Gegenüberstellung verschiedener Führungsprinzipien (vgl. Brecher et al. 2014, Rn. 28; Denkena 2003) .....	78
Tabelle 13:	Verknüpfung der Anleitungsarten mit den Anleitungsschritten und -stufen .....	89
Tabelle 14:	Anleitungsformen für die regelseitige Projektion des Entnahmeverganges .....	92
Tabelle 15:	Zusammensetzung der Untersuchungstichprobe .....	136
Tabelle 16:	Deskriptive Statistik der Kommissionierzeiten mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	183
Tabelle 17:	Deskriptive Statistik der Kommissionierzeiten mit Pick-by-Light und -Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	183
Tabelle 18:	Deskriptive Statistik der Kommissionierfehlerrate (in %) mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	184
Tabelle 19:	Deskriptive Statistik der Kommissionierfehlerrate (in %) mit Pick-by-Light und Pick-by-Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen.....	184
Tabelle 20:	Deskriptive Statistik der Subjektiven Beanspruchung mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen .....	185
Tabelle 21:	Deskriptive Statistik der Subjektiven Beanspruchung mit Pick-by-Light und -Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen.....	185

## Abkürzungsverzeichnis

AEA	American Evaluation Association
AGG	Allgemeines Gleichbehandlungsgesetz
ANOVA	Analysis of Variance (Einfaktorielle Varianzanalyse)
AR	Augmented Reality
BGG	Behindertengleichstellungsgesetz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BRD	Bundesrepublik Deutschland
Bzgl.	Bezüglich
Bzw.	Beziehungsweise
Ca.	Circa
CAD	Computer-Aided Design
DGP	Deutsche Gesellschaft für Psychologie
DGS	Deutsche Gesellschaft für Soziologie
DIMDI	Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information
Engl.	Englisch
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FIFO	First In – First Out
Ggf.	Gegebenenfalls
HMD	Head-Mounted-Display
ICF	International Classification of Functioning, Disability and Health
ICIDH	International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps
IL	Individueller Leistungsgrad
Kap.	Kapitel
KLT	Kleinladungsträger
KS-Test	Kolmogorov-Smirnov-Test
IM	Leistungsgeminderte Mitarbeiter
Lt.	Laut
MDT	Mobiles Datenterminal
Mio.	Millionen
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index
Nr.	Nummer
PzW	Person-zur-Ware
REFA	Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung
RFID	Radio-Frequency Identification
RGB	Rot, Grün, Blau
SGB	Sozialgesetzbuch
UN-BRK	Behindertenrechtskonvention der Vereinten Nationen
Vgl.	Vergleiche
WfbM	Werkstätten für behinderte Menschen
WHO	World Health Organization
WMS	Warehouse-Management-System
WzP	Ware-zur-Person
Z.B.	Zum Beispiel

# 1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Ausgangssituation der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts beschrieben und es werden die daraus resultierenden Herausforderungen für Unternehmen dargestellt. Vor diesem Hintergrund wird die Motivation für die Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei manuellen Kommissioniertätigkeiten dargestellt. Abschließend werden die Zielsetzung und die sich hieraus ergebende Struktur der vorliegenden Arbeit geschildert und grafisch verdeutlicht.

## 1.1 Ausgangssituation

Eine der größten Herausforderungen für produzierende Unternehmen in der heutigen Zeit ist der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit. Gerade in Deutschland sind für ein nachhaltiges Wachstum zur Standort- und Zukunftssicherung – neben der Verbesserung der Produktivität durch Einsparungen – vor allem Innovationen unabdingbar. In dieser Hinsicht kommt neuartigen technologischen Entwicklungen und Produkten, wie z.B. Assistenzsystemen, eine besondere Schlüsselrolle im Kampf um Marktanteile von Unternehmen, aber auch zur Generierung von erkennbaren gesellschaftlichen Verbesserungen zu (vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2014; Milberg 2003).

Innovationen spielen nicht nur im Produktbereich eine wichtige Rolle, sondern auch in bestehenden Geschäftsprozessen. Hier sind kontinuierliche Weiterentwicklungen und Verbesserungen der Abläufe erforderlich, um reaktionsschnell, flexibel und wirtschaftlich produzieren bzw. auf Kundenanfragen reagieren zu können. An einem Hochlohnstandort wie Deutschland müssen Unternehmen neue Technologien und Weiterentwicklungen in den Kernbereichen der industriellen Produktion, wie der Kommissionierung, Fertigung und Montage, stetig auf Eignung überprüfen und gegebenenfalls in ihre Prozesse übernehmen (vgl. Patron 2004).

Neben dem hohen Innovationsdruck beeinflussen noch eine Reihe weiterer, ineinander übergehender Herausforderungen aus dem Bereich der Technik, des Menschen, der Organisation und der Umwelt den Wandel der heutigen Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts (vgl. Spanner-Ulmer 2012)

In der Gesamtheit der Veränderungen – bezogen auf diese Lebens- und Arbeitswelt – kommt der Globalisierung mit ihren Einflüssen und Auswirkungen auf das Wirtschaftssystem eine bedeutende Rolle zu. In den vergangenen Jahrzehnten hat diese maßgeblich die Marktveränderung vom Anbieter- über den Käufer- hin zum Individualmarkt beeinflusst (vgl. Günthner et al. 2004; Lotter 2012).

Diese Entwicklung hat wiederum für Unternehmen zur Folge, dass sie den Kunden Differenzierungsmerkmale wie z.B. kundenindividuelle Produkte und Diversifizierung bieten müssen, um im weltweiten Verdrängungswettbewerb bestehen zu können. Die steigende Variantenvielfalt mit dem gleichzeitigen Trend zu immer kürzeren Produktlebenszyklen erfordert jedoch eine auftragsbezogene Produktion, woraus eine Steigerung der Komplexität im Produktions- und Logistiknetzwerk resultiert. Diese Problematik wird durch den Trend zu immer kürzeren Liefer- und Prozesszeiten noch zusätzlich verstärkt (vgl. Voigt et al. 2007).

Die Käufermacht wurde vor allem im vergangenen Jahrzehnt durch die Digitalisierung und Vernetzung mittels des Internets zusätzlich gestärkt. Neben den Veränderungen der Kräfteverhältnisse sind auch eine sinkende Kundenloyalität und ein gestiegenes Kostenbewusstsein zu beobachten. Durch die Informations- und Kommunikationstechnologien haben Kunden heutzutage eine Vielzahl von Möglichkeiten, an gewünschte Produkte zu gelangen und diese zusätzlich nach ihren Wünschen zu modifizieren und zu vergleichen (vgl. Günthner et al. 2008). Diese Transparenz hat ein gestiegenes Preisbewusstsein sowie steigende Nachfrageschwankungen und einen Wettbewerbsdruck zur Folge, der zu sinkenden Liefer- und Prozesszeiten führt. Zum einen ist Flexibilität die oberste Devise um auf Nachfrageschwankungen und Markttrends zu reagieren; zum anderen stellt die Auftragsdurchlaufzeit und die davon abhängige Lieferzeit einen verkaufsentscheidenden Wettbewerbsfaktor dar (vgl. Reif 2009).

Zur Verdeutlichung: Die BMW Group bietet beispielsweise derzeit ca. 350 Fahrzeugmodellvarianten an, welche mit bis zu 500 verschiedenen Sonderausstattungen konfigurierbar sind, was schlussendlich zu einer möglichen Anzahl von  $10^{31}$  Varianten pro Fahrzeugmodell führt (vgl. Götz 2007). Ein Fahrzeug der Premiumklasse besteht dabei aus ca. 18.000 bis 20.000 Einzelteilen, wird mit einer Eigenfertigungstiefe von nur 25 % in bis zu zehn weltweit verteilten Fertigungsstufen produziert und kann im Idealfall bereits 18 Tage nach der kundenindividuellen Bestellung ausgeliefert werden, wobei bis zu sechs Tage vor Auslieferung noch Änderungswünsche möglich sind (vgl. Boppert 2008; Wannenwetsch 2002).

Dieser Individualisierungstrend hat zwei Ursachen: Der Kunde, der individualisierte Produkte wünscht, und die Unternehmen, welchen sich durch das Angebot von individualisierten Produkten die Chance der Differenzierung bietet. Diese Entwicklung erfordert allerdings sowohl für die Produktion als auch für die Logistik neue Rahmenbedingungen, da mit der Individualisierung eine Zunahme der Variantenvielfalt und damit eine Reduzierung der Fertigungs-, als auch Auslieferungslose bis auf die Stückzahl eins verbunden ist (vgl. Günthner et al. 2008).

Neben den Veränderungen der Globalisierung und Individualisierung werden anlässlich der aktuellen Debatten zum Klimawandel und der Ressourcenknappheit (siehe auch 5. UN-Klimareport 2013) auch aus dem Bereich der Umwelt neue Herausforderungen und Anforderungen an die Lebens- und Arbeitswelt gestellt. Die Verknappung der Ressourcen nimmt die Produktion und Logistik mit ihren Prozessen in die Pflicht, Emissionen zu reduzieren und energieeffizienter zu agieren. Gerade in der Intralogistik<sup>1</sup> kann durch eine Verknüpfung unterschiedlicher Maßnahmen zur Prozessoptimierung und Fehlerreduzierung eine Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine Verbesserung der Energieeffizienz erreicht werden (vgl. Günthner et al. 2008). Diese Thematik kann in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher betrachtet werden.

---

<sup>1</sup> Die Intralogistik stellt eine zukunftsweisende Branche dar, welche „die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen“ (Günther 2006, S. 6) umfasst.

Im beständigen Wandel der Lebens- und Arbeitswelt steht neben der Produktion vor allem die Logistik unter Handlungsdruck und muss sich den geänderten Rahmenbedingungen anpassen. Zusätzlich konzentrieren sich viele Unternehmen aufgrund der immer komplexeren Produkte und Prozesse auf ihre Kernkompetenzen und lagern ganze Unternehmensbereiche aus (vgl. Reif 2009). Diese organisatorische und geografische Trennung zwischen der Produktion und den Abnehmern führt zusätzlich dazu, dass der Stellenwert der Logistik in diesem weltweiten Netzwerk weiter ansteigt (vgl. Hahn-Woernle 2006).

Durch die Gesamtheit dieser Veränderungen hat gerade auch die Intralogistik als Querschnittstechnologie der Logistik an Bedeutung gewonnen. Deren Aufgabe ist es, eine unterbrechungsfreie Versorgung der Produktion sicherzustellen, obwohl die Bedarfe und innerbetrieblichen Transporte nicht mehr genau vorherzusagen sind, die Transportintervalle sich verkürzen und die Mengenbedarfe der einzelnen Aufträge sich reduzieren (vgl. Günthner et al. 2008).

Das Kernelement der heutigen Lager- und Intralogistik, welches wesentlich zum wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen mit logistischen Prozessen beiträgt, ist die Kommissionierung (siehe Kap. 2.1). Vor allem durch eine steigende Artikelvielfalt, kundenindividuelle Konfektionierungen und den Versandhandel hat dieser Bereich in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen (vgl. Günthner und Heptner 2007). In diesem unternehmensinternen Bereich der logistischen Kette werden zwischen Wareneingang und -ausgang die Kunden- und Fertigungsaufträge unter den Faktoren der Zeit, der Qualität und der Menge zusammengestellt. Dies wiederum hat Auswirkungen auf die Kennzahlen der Liefertreue und -qualität sowie der Produktivität bzw. Wirtschaftlichkeit, was die langfristige Kundenbindung und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen maßgeblich beeinflusst (vgl. Nave 2009). Vor allem der Qualitätsaspekt rückt immer mehr in den Mittelpunkt, denn Kommissionierfehler verursachen neben den direkt quantifizierbaren Folgekosten wie z.B. Produktionsausfällen, zusätzlichen Transporten und Reklamationsbearbeitungen auch noch indirekte Kosten, wie z.B. den Verlust der Kundenzufriedenheit und die Abwanderung unzufriedener Kunden zu Wettbewerbern (vgl. Lolling 2003).

Die Kommissionierung stellt als Komponente der Intralogistik einen der komplexesten und personalintensivsten Bereiche der logistischen Kette dar (vgl. Hompel et al. 2011, v). Dies spiegelt sich vor allem auch am hohen Anteil der Kommissionierung an den Logistikkosten wider (siehe Kap. 2.1.1). Die manuelle Ausführung ist trotz zahlreicher Entwicklungen in den vergangenen Jahren von rein manuellen Systemen bis hin zu vollständig automatisierten Lösungen<sup>2</sup> nach wie vor die häufigste in der Praxis verbreitete Art eines Kommissioniersystems. Automatisierte Logistiksysteme bieten häufig nur bei hoher Auslastung Kostenvorteile und gelten meist als kompliziert, starr und unflexibel (vgl. Straube et al. 2005). Aufgrund der kognitiven Fähigkeiten, dem flexiblen Tast- und Greifvermögen sowie den geringen Kosten ist der Mensch im Kommissionierbereich in den meisten Anwendungsfällen noch nicht durch Maschinen ersetzbar (vgl. Arnold und Furmans 2009) (siehe Kap. 2.2). Um in den aktuellen Entwicklungen einer steigenden Komplexität von Produktions- und Logistikprozessen jedoch langfristig mit Menschen wettbewerbsfähig bleiben zu können, ist sowohl eine hohe Flexibilität mit kurzen Kommissionier-, Rüst- und Einlernzeiten, als auch ein hoher Qualitätsstandard bei niedrigen Kosten erforderlich. Dabei führen die manuellen Tätigkeiten durch die häufig auftretenden Änderungen im Arbeitsablauf der Mitarbeiter einerseits zu einem abwechslungsreicheren und dadurch interessanteren Arbeitsplatz. Auf der anderen Seite steigen jedoch die Anforderungen bezüglich Ausdauer-, Konzentrations- und Leistungsfähigkeit und damit die Fehleranfälligkeit, je länger die

---

<sup>2</sup> In der Industrie beträgt der durchschnittliche Automatisierungsgrad bei produzierenden Unternehmen 28 %. Bei Logistikdienstleistern liegt er hingegen bei nur 15 % (vgl. Straube et al. 2005).

Mitarbeiter tätig sind (vgl. Reinhart und Zäh 2014). Bedingt durch die steigende Sortimentsvielfalt, die kurzen Lieferzeiten und auch die wachsenden Serviceanforderungen, ist zur Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität bei manuellen Kommissioniertätigkeiten eine ebenfalls hohe Qualifikation erforderlich.

Gerade diese Entwicklung, die den Menschen wieder mehr in den Fokus rücken lässt, stellt eine weitere zentrale Herausforderung der kommenden Jahre für Unternehmen in Deutschland dar.

Das Statistische Bundesamt prognostiziert einen Rückgang des Bevölkerungsstandes in Deutschland von 2008 bis 2060 um 27 %. Dabei sinkt der Anteil der für die manuelle Kommissionierung wichtigen Gruppe der 20- bis 65-jährigen von 50 auf 36 Millionen (hierbei ist bereits eine jährliche Zuwanderungsrate von 200.000 Personen berücksichtigt) (vgl. Statistisches Bundesamt 2009). Die Herausforderung des demografischen Wandels mit einer stetig älter werdenden Gesellschaft und dem damit zusammenhängenden Leistungswandel wird durch den aktuell vorherrschenden Fachkräftemangel in Deutschland noch verstärkt. In der „Engpassanalyse 2013“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie werden vor allem in den industriellen Berufsfeldern Engpässe festgestellt (vgl. BMWi 2013).

## 1.2 Motivation

Aufgrund des sich stetig verschärfenden Mangels an Nachwuchs- und Fachkräften sind viele Unternehmen nicht mehr in der Lage, innerhalb ihrer Tätigkeitsfelder geeignete Mitarbeiter zu finden. Dieser Mangel erfordert die Schaffung neuer Möglichkeiten zur Generierung von Beschäftigten.

In diesem Zusammenhang stellen Werkstätten für behinderte Menschen (WfbM, siehe Kap. 2.3.4) mit ihren fast 300.000 Werkstattbeschäftigten in Deutschland (vgl. bagwfbm 2013) ein bisher wenig beachtetes Potenzial an Arbeitskräften dar. In diesem Kontext wird der Entwicklung von technischen Unterstützungstechnologien eine wichtige Rolle zukommen.

Die Werkstätten sehen sich neben ihrem Auftrag zur Förderung und Unterstützung der Teilhabe<sup>3</sup> an Arbeit und der Persönlichkeit ihrer Beschäftigten aufgrund ihrer produktionsorientierten Aufgabenstellung zunehmend einem Herstellungsdruck ausgesetzt, um als „profitables“ Unternehmen zu bestehen (vgl. Schmid 2003) (siehe Kap. 2.3.4 und Kap. 5.2.1). Dieses Gefüge der heutigen Werkstattarbeit wird als Zielkonflikt zwischen Pädagogik und Ökonomie bezeichnet und besteht als prekäres Verhältnis zwischen der Förderung von Werkstattangehörigen und der Wirtschaftlichkeit ihrer Arbeitsleistung bzw. der Einrichtung (vgl. Seyl 1996) (siehe Abbildung 2).

Daraus resultiert, dass es zukünftig nicht mehr nur aus demografischen und sozialen, sondern auch aus wirtschaftlichen Aspekten erforderlich sein wird, leistungsgeminderte Mitarbeiter<sup>4</sup> sowohl in WfbMs als auch im industriellen Umfeld noch besser zu befähigen und zum Beispiel für manuelle Tätigkeiten im Kommissionierbereich einzusetzen.

Zudem sehen sich auch die WfbMs zunehmend stärker den Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts ausgesetzt (siehe Abbildung 1). Insbesondere durch die immer

---

<sup>3</sup> Der Begriff der Teilhabe bezieht sich in der vorliegenden Arbeit auf die berufliche Teilhabe von Menschen mit (geistiger) Behinderung (siehe Kap. 2.3.2 und Kap. 4.2.2). Dieser ist wie in Kapitel 2.3 dargestellt primär formal definiert und bezieht sich auf einen nach § 33 bis § 43 des neunten Sozialgesetzbuches (SGB IX) gesetzlich verankerten Leistungsanspruch für Menschen mit Behinderung.

<sup>4</sup> Die Bezeichnung „leistungsgeminderte Mitarbeiter“ wird in der vorliegenden Arbeit synonym für Personen mit einer Beeinträchtigung der funktionalen Gesundheit verwendet. Eine solche Beeinträchtigung schließt eine Einschränkung der Leistungsfähigkeit ein, welche sich auf das maximale Leistungsniveau einer Person bzgl. einer Aufgabe oder Handlung unter Test-, Standard- oder hypothetischen Bedingungen bezieht (vgl. Schuntermann 2007).

häufiger bestehenden Abhängigkeiten als Zulieferer, wie z.B. für die Automobilindustrie und den dort verbreiteten Produktionsstrategien (z.B. Just-in-Time oder -Sequence) sinken die Bestände der Rohmaterial- und Fertigwarenlager, wodurch die Anforderungen an die Leistungserfüllung der Werkstätten hinsichtlich Flexibilität, Durchsatz, Prozesssicherheit und Fertigungs-, Kommissionier- sowie Lieferzeit stetig zunehmen.

Des Weiteren steigen durch politische Forderungen auch auf Seiten der Industrie die Bemühungen zu einer inklusiven Arbeitsmarktgestaltung, wie dies in Artikel 27 der Behindertenrechtskonvention der Vereinten Nationen (UN-BRK) für diese Personengruppe gesetzlich vorgesehen ist (vgl. Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2011).

Die Summe der genannten Veränderungen stellt sowohl die WfbMs als auch die Industrie vor die Aufgabe, zusätzliche Unterstützung für ihre manuellen Tätigkeiten wie z.B. die Kommissionierung zu schaffen, um diese auch zukünftig zuverlässig mit Menschen durchführen zu können.

Gleichzeitig bietet gerade auch die Dominanz der manuellen Tätigkeiten im Kommissionierbereich ein großes Potenzial zur wirtschaftlichen Optimierung dieses unternehmensinternen Prozesses durch eine Verbesserung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Menschen (vgl. Lolling 2003).

In diesem Zusammenhang stellen assistierende Systeme einen zukunfts- und erfolgsträchtigen Ansatz zur Anleitung, Unterstützung und Kontrolle von Industrieprozessen dar.

Da bisher jedoch keine solche Technologie verfügbar ist (siehe Kap. 2.5), ergibt sich die Notwendigkeit, insbesondere nach neuen und innovativen Möglichkeiten zur technischen Unterstützung von manuellen Kommissioniertätigkeiten mit Assistenzsystemen für leistungsgeminderte und -gewandelte Mitarbeiter, aber auch für Mitarbeiter ohne Einschränkungen zu forschen. Dadurch sollen Lösungsmöglichkeiten geschaffen werden, um dem bestehenden Spannungsfeld der WfbMs entgegenzuwirken.



Abbildung 2: Spannungsfeld von Werkstätten für behinderte Menschen durch aktuelle Anforderungen

### 1.3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die nutzerzentrierte Entwicklung und Evaluierung eines funktionsfähigen und ergonomischen Assistenzsystems zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung. Das entwickelte Assistenzsystem soll damit einen wichtigen Beitrag zur Ermöglichung der Teilhabe an Arbeit sowie der daraus resultierenden Förderung

der Persönlichkeit von Menschen mit Behinderung leisten und damit eine Antwort auf das Spannungsfeld der Anforderungen an WfbMs geben.

Zudem soll der Entwicklungsprozess des Assistenzsystems innerhalb der vorliegenden Arbeit mit seiner Vorgehensweise und Struktur als konzeptionelle Vorlage für die aufgabenorientierte und nutzergerechte Gestaltung und Entwicklung von weiteren Assistenzsystemen (im industriellen Umfeld) dienen.

Die Vorgehensweise zur nutzerzentrierten Entwicklung des Assistenzsystems (siehe auch Kap. 2.5) orientiert sich unter anderem an den Grundsätzen der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (DIN EN ISO 6385) und der Mensch-System-Interaktion (DIN EN ISO 9241 – 210). Die daraus abgeleitete Struktur der vorliegenden Arbeit lässt sich in acht Hauptphasen unterteilen, welche in Abbildung 3 grafisch dargestellt sind.

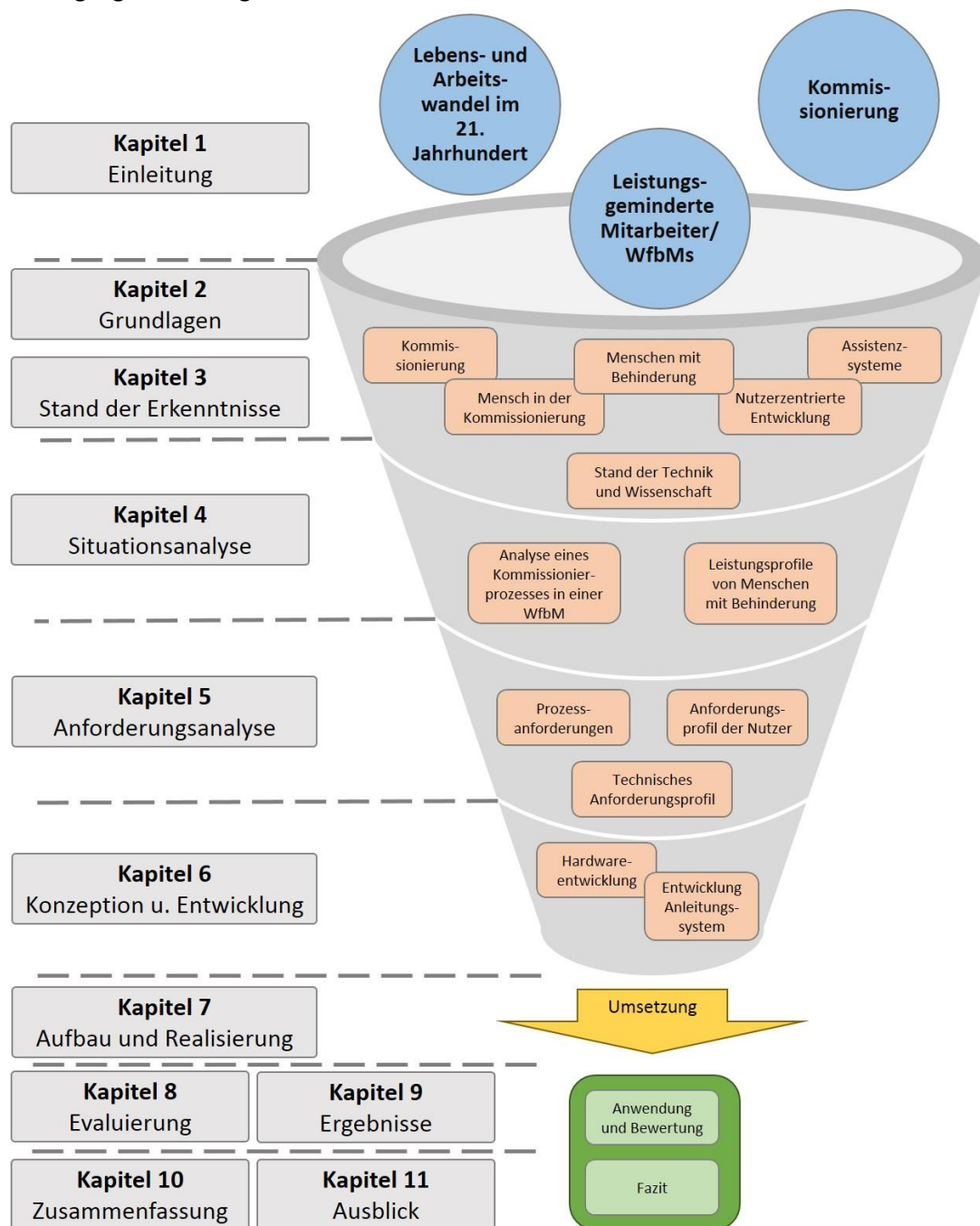


Abbildung 3: Aufbau und Struktur der Arbeit



## **2 Grundlagen zur Entwicklung eines Assistenzsystems für Kommissionierprozesse**

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und Begriffe, welche für die Entwicklung eines Assistenzsystems für leistungsgeminderte Menschen sowie für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlich sind, erläutert. Dabei erfolgt zuerst die Einführung relevanter Begrifflichkeiten und Grundlagen der Kommissionierung. Der nachfolgende Schwerpunkt liegt auf der Nutzerzielgruppe, welche sich im vorliegenden Fall aus Menschen mit einer Behinderung zusammensetzt, sowie auf der Darstellung der Grundlagen der nutzerzentrierten Entwicklung. Abschließend werden die wichtigsten Grundlagen zum Themengebiet „Assistenzsysteme“ erläutert.

### **2.1 Kommissionierung**

Um für den Verlauf dieser Arbeit ein einheitliches Grundlagenverständnis zu schaffen, werden zunächst elementare Begriffe des Themengebiets der Kommissionierung und anschließend der charakteristische Aufbau von Kommissioniersystemen erläutert, Zusammenhänge und Grenzen des Materialflusssystems aufgezeigt und schließlich die technischen Funktionselemente dargestellt.

#### **2.1.1 Begriffe und Bedeutung der Kommissionierung**

Der Vorgang der Kommissionierung ist ein Kernelement und zugleich die schwierigste Aufgabe der innerbetrieblichen Logistik, welche wesentlich zum wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens beiträgt. Die große Bedeutung der Kommissionierung lässt sich auf zwei wesentliche Aspekte zurückführen: Zum einen auf den hohen Personalanteil, welcher sich aus den komplexen Handhabungsprozessen ergibt und die Chancen einer weitreichenden Automatisierung minimiert, zum anderen auf den unmittelbaren Einfluss, den die Kommissionierabläufe auf die Leistung und den Servicegrad für den Kunden haben, sowie die damit zusammenhängende Wettbewerbsfähigkeit. Daher können in der Regel nur fehlerfreie Kommissioniersysteme mit großer Effizienz den hohen Marktanforderungen genügen (vgl. Hompel et al. 2011; Gudehus 2012).

Die Zusammenstellung von Einzelpositionen zu einem Kundenauftrag<sup>5</sup> unter den wesentlichen Faktoren der Qualität und Zeit wird unter dem Begriff der Kommissionierung nach der VDI-Richtlinie 3590 folgendermaßen definiert:

*„Kommissionieren hat das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen“ (VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1, S. 2).*

Die hohe Komplexität der Kommissionierung (z.B. durch die Entnahme von kleinen Verpackungseinheiten mit unterschiedlichen Dimensionen) reduziert die Möglichkeiten einer weitreichenden Automatisierung, wie z.B. durch den Einsatz von Kommissionierautomaten und -robotern, auf Einzelfälle. Aus diesem Grund wird die manuelle Kommissionierung auch zukünftig eine große Bedeutung haben.

---

<sup>5</sup> Unter einem Kundenauftrag wird die unternehmensinterne oder -externe Bestellung eines Kunden bei einem Lieferanten verstanden. Hierbei besteht ein Kundenauftrag aus verschiedenen Positionen ( $N \geq 1$ ), wobei eine Position genau einem Artikeltyp in definierter Menge entspricht und eine Zeile des Auftrags darstellt. Die unternehmensseitig eingehenden Kundenaufträge sind in der Regel für die direkte Nutzung im Kontext einer effizienten Kommissionierung ungeeignet. Deshalb ist eine Auftragsaufbereitung erforderlich, durch welche der Kundenauftrag in einen Kommissionierauftrag umgewandelt wird. Dies kann in Abhängigkeit der eingesetzten Informationstechnologie des Kommissioniersystems auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen (vgl. Hompel und Schmidt 2008) (siehe Kap. 3.1).

Für die erfolgreiche Durchführung eines manuellen Kommissionierprozesses müssen dem Kommissionierer die Informationen eines Kommissionierauftrags<sup>6</sup>, wie z.B. der nächste Zugriffsplatz, die angeforderten Artikel, die Entnahmemengen und der Ablageort, bereitgestellt oder angezeigt werden. Für die Weitergabe dieser Informationen bestehen zwei Möglichkeiten:

1. Mit Beleg, z.B. in Form von Pickzetteln, Kommissionierlisten oder Auftragsbelegen.
2. Ohne Beleg, z.B. über optische Anzeigen, Displays oder akustisch mittels Kopfhörer.

Die eingesetzte Art der Informationsbereitstellung (siehe Kap. 2.5) hat dabei erhebliche Auswirkungen auf die Kosten, die Zeit und die Qualität des Kommissionierens (vgl. Gudehus 2012), auf welche folgend eingegangen wird.

### **Kommissionierkosten**

Die Kommissionierung ist sowohl aus Kosten- und Aufwands-, als auch aus Kunden- und Wettbewerbssicht der Kernprozess im Lagerbereich. In Abbildung 4 wird anhand des Anteils der Kommissionierkosten bezogen auf die Lagerkosten bzw. den Umsatz die Bedeutung der Kommissionierung verdeutlicht (vgl. Nave 2009).

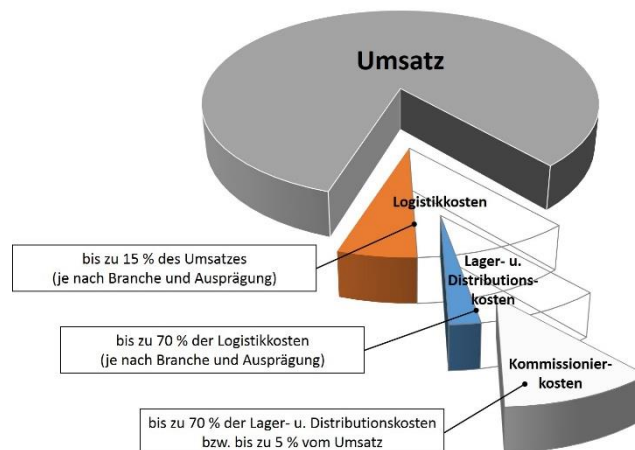


Abbildung 4: Bedeutung der Kommissionierkosten (vgl. Nave 2009)

### **Kommissionierzeit**

Der Zeitaufwand für die konventionelle Kommissionierung nach der Person-zur-Ware-Methode (PzW) (siehe Kap. 2.1.4) setzt sich aus mehreren Tätigkeiten zusammen. Dabei benötigt das Zurücklegen der Wege zwischen den einzelnen Lager- bzw. Entnahmeorten in der Regel den größten Anteil der Kommissionierzeit. Diese lässt sich insgesamt als die Summe aus der

- Rüst- oder Basiszeit (dient zur Vorbereitung des Kommissionierauftrags),
- Wegzeit (entsteht nur einmal pro Entnahmeort),
- Greifzeit (dient zur Entnahme und dem Ablegen der Ware) und
- Orientierungs- oder Totzeit (dient zur Vorbereitung der Entnahme) abbilden (siehe Abbildung 5).

<sup>6</sup> Ein Kommissionierauftrag wird durch die Anpassung an die jeweiligen Belange der Kommissionierung aus einem oder mehreren Kundenaufträgen abgeleitet. Hierzu werden die Daten des Kundenauftrags zusätzlich mit kommissionierspezifischen Informationen wie z.B. Angaben zum Lager- bzw. Entnahmeort ergänzt und an den Kommissionierer weitergegeben.



Abbildung 5: Zusammensetzung der Kommissionierzeit

Die einzelnen Zeitanteile variieren in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur und der mittleren Anzahl an Auftragspositionen pro Auftrag mit ca. 5-10 % für die Rüst- oder Basiszeit, ca. 20-30 % für die Orientierungs- oder Totzeit, ca. 40-60 % für die Wegzeit und ca. 15-35 % für die Greifzeit verhältnismäßig stark (vgl. Koether 2014; Hompel und Schmidt 2008).

### **Kommissionierqualität bzw. -fehler**

Die Kommissionierqualität hat wesentliche Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit und langfristige Kundenbindung. Laut der DIN EN ISO 9000 liegt der Hauptschwerpunkt des Qualitätsmanagements in der Erfüllung der Kundenanforderungen und dem Bestreben, die Kundenerwartungen zu übertreffen (vgl. DIN EN ISO 9000). Im Kontext der Kommissionierung beinhaltet die Erfüllung der Kundenanforderungen, dass die richtigen Objekte (Artikel) in der richtigen Menge (Stückzahl) und im richtigen Zustand (Beschaffenheit) dem Kunden bereitgestellt werden. Können diese Qualitätsanforderungen nicht erfüllt werden, spricht man von einem Fehler (vgl. Reif 2009). Zum Zweck der Quantifizierung der Qualität werden die relativen Häufigkeiten dieser „Nichterfüllung“ zu einer Kennzahl, der Fehlerhäufigkeit, aufsummiert. Dabei wird die Fehlerhäufigkeit maßgeblich von der menschlichen Zuverlässigkeit (siehe Kap. 2.2) bei der Aufgabenerfüllung mitbestimmt (vgl. Lolling 2003).

In der Kommissionierung lässt sich die Nichteinhaltung der Qualitätsaspekte in vier Fehlerarten mit unterschiedlichen Fehleranteilen ableiten (siehe Abbildung 6).

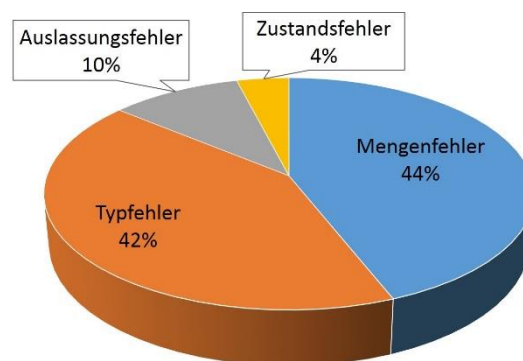


Abbildung 6: Anteile der Fehlerarten in den Unternehmen (vgl. Lolling 2003)

Die einzelnen Fehler können durch verschiedene Fehlhandlungen entstehen wie z.B. durch die Entnahme der falschen Menge (Mengenfehler), durch die Entnahme aus einer falschen Bereitstellereinheit (Typfehler), durch die falsche Etikettierung (Zustandsfehler) oder durch das Vergessen einzelner Positionen (Auslassungsfehler) (vgl. Lolling 2003).

Nach Rammelmeier et al. lassen sich diese Fehlerarten auf verschiedene Ursachen zurückführen, die sich anhand eines Ursache-Wirkungs-Diagramms wiederum auf den „Menschen“, die „Methode“, das „Umfeld“ und „Sonstiges“ zurückführen lassen (vgl. Rammelmeier et al. 2012).

### 2.1.2 Aufbau von Kommissioniersystemen

Ein Kommissionierprozess setzt sich – unter dem Hauptziel der Auftragszusammenstellung – aus einer Reihe von Einzeltätigkeiten zusammen. Für dessen Realisierung werden aktuell unterschiedlichste Techniken und Strategien eingesetzt. Aufgrund der engen Verflechtung von Menschen, technischen Komponenten, Informationsmanagement sowie Ablauf- und Organisationsstruktur entwickelt sich die Gestaltung und der Betrieb von Kommissioniersystemen meist zu einer sehr komplexen Arbeitsaufgabe. Dabei stellen der Austausch von Informationen, Gütern oder Energie über die Grenzen des Kommissioniersystems hinweg den Systeminput und -output dar (vgl. Hompel et al. 2011).

Das Zusammenwirken der einzelnen Elemente eines Kommissioniersystems innerhalb einer Arbeitsorganisation kann nach der DIN EN ISO 6385 und in Anlehnung an Schlick als Arbeitssystem<sup>7</sup> beschrieben und dargestellt werden (siehe Abbildung 7).

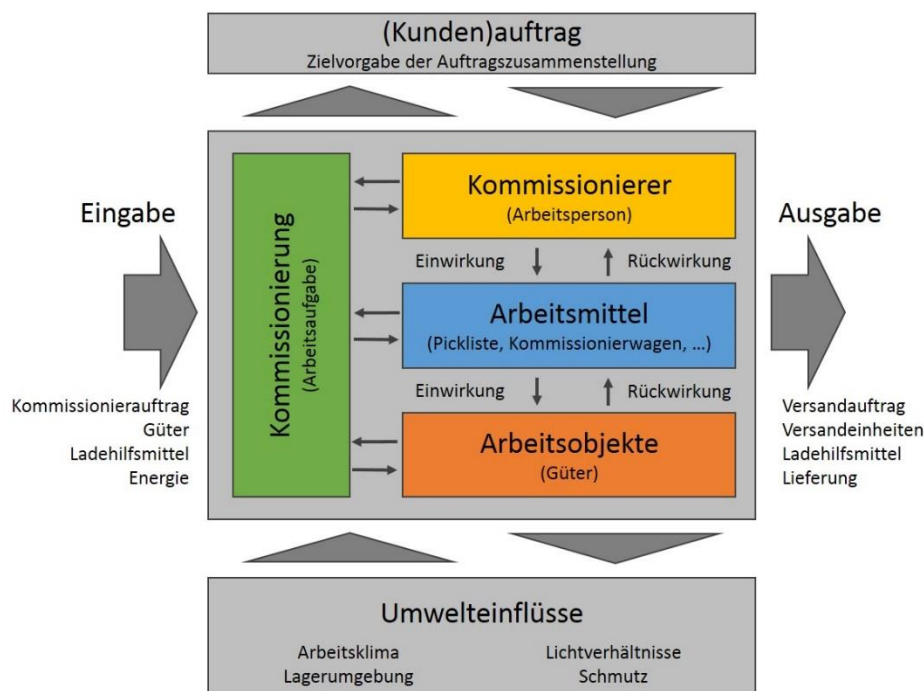


Abbildung 7: Grafische Darstellung eines Kommissioniersystems als Arbeitssystem (vgl. Schlick et al. 2010; DIN EN ISO 6385)

Für die erfolgreiche Erfüllung eines in einem Kommissioniersystem eingehenden Auftrages ist es notwendig, die richtigen Informationen weiterzugeben und die korrekten Materialien physisch zu bewegen. Alle hierfür erforderlichen Vorgänge werden durch eine übergeordnete Organisation koordiniert. Erst in Kombination mit dieser entsteht ein funktions- und leistungsstarkes Kommissioniersystem (vgl. Schulte 1993).

<sup>7</sup> Ein Arbeitssystem ist nach der DIN EN ISO 6385 als ein „System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems, innerhalb des Arbeitsraums und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen, zu erfüllen“ (DIN EN ISO 6385, S. 6) definiert.

Nach VDI-Richtlinie 3590 lässt sich ein Kommissioniersystem daher in die drei wesentlichen Subsysteme

- eines Informationssystems,
- eines Materialflusssystems und
- eines Organisationssystems untergliedern.

Diese Teilbereiche sind mit den zugehörigen Vorgängen und Realisierungsmöglichkeiten in Tabelle 3 (S. 62) in einem morphologischen Kasten<sup>8</sup> dargestellt sowie folgend näher beschrieben. Die tabellarische Darstellung dient zum einen als strukturierte Planungsgrundlage und zum anderen, durch die vertikale Kombination verschiedener Realisierungsmöglichkeiten, als Entscheidungshilfe bei der Auswahl und Entwicklung eines Kommissioniersystems (vgl. VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1).

### **Informationssystem**

Ein Informationssystem setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammen, welche zur Auslösung und/oder Durchführung der materialflusstechnischen Abläufe erforderlich sind. Die wesentlichen Informationselemente sind hierbei

- der Kundenauftrag, welcher mindestens die Informationen zur Artikelidentifikation und zur Bestellmenge enthält,
- der Kommissionierauftrag, welcher durch die Verknüpfung der Auftragsdaten mit den spezifischen Daten des Kommissioniersystems erzeugt wird und
- die Position, welche einer Zeile in einem Kommissionierauftrag entspricht und alle relevanten Informationen für die Kommissionierung eines Artikels enthält.

Neben den Informationselementen lässt sich der Informationsfluss in die vier Grundvorgänge der Auftragserfassung, der Auftragsaufbereitung, der Weitergabe (Übermittlung der Auftragsinformationen) und der Quittierung (Bestätigung der Entnahme, ggf. mit Informationseingabe) unterteilen (vgl. VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1). Die für die Kommissionierung erforderlichen Informationen können auf verschiedene Arten und mit Unterstützung unterschiedlicher Technologien vermittelt werden. Die derzeit gebräuchlichsten Arten sowie neue Ansätze der Informationsbereitstellung für die Kommissionierung werden in Kapitel 2.5 näher vorgestellt.

### **Materialflusssystem**

Das zweite Subsystem des Materialflusses wird als Verkettung von Vorgängen definiert, bei welcher ein Transformationsprozess erfolgt, der eine Veränderung des Systemzustands von Gütern hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität bewirkt. Dabei setzt sich das Materialflusssystem eines Kommissioniersystems aus Vorgängen zusammen, die in einem Zusammenhang mit der Bereitstellung, der Entnahme und der Abgabe der Güter sowie der Bewegung des Kommissionierers stehen. Die Bereitstellung der Güter kann dabei statisch (Güter verbleiben zwischen Ein- und Auslagerung am selben Ort) oder dynamisch (erforderliche Güter werden zum Entnahmeort befördert), zentral (Entnahme an einem festen Ort) oder dezentral (Entnahme an verschiedenen Orten) sowie mit geordneter oder ungeordneter Orientierung und Lage erfolgen. Insofern der Kommissionierer sich zu den entnehmenden Gütern bewegt, kann dies ein-, zwei- oder dreidimensional, manuell, mechanisch oder automatisch erfolgen. Eine ebenerdige Kommissionierung

---

<sup>8</sup> Ein morphologischer Kasten ist eine Kreativitätstechnik, die ein Problem in seine grundlegenden Bestandteile zergliedert. Dabei werden für jedes Problemelement Ausprägungen bzw. Lösungsmöglichkeiten gesucht und strukturiert dargestellt. Eine Kombination der elementspezifischen Lösungsmöglichkeiten soll dazu dienen, das Gesamtproblem zu lösen (vgl. Schawel und Billing 2012).

entlang einer Regalfront entspricht dabei beispielsweise einer eindimensionalen Fortbewegung. Der Zugriff und die Entnahme können manuell (durch die menschliche Hand), mechanisch (durch vom Menschen gesteuerte Hilfsmittel) oder automatisch (ohne Einwirkung des Menschen, z.B. durch Roboter) erfolgen. Im Anschluss an die Entnahme werden die entnommenen Güter statisch (unbewegte Sammeleinrichtung) oder dynamisch (Fördermittel in Bewegung), zentral (an fest installierten Abgabeorten) oder dezentral (an mitgeführten Sammeleinrichtungen) sowie geordnet oder ungeordnet abgelegt.

### **Organisationssystem**

Die Aufgabe des Organisationssystems ist es, die Vorgänge des Material- und Informationsflusses so zu regeln, dass ein funktionsfähiges und effizientes Gesamtsystem entsteht. Bei der Auswahl einer solchen Struktur und Steuerung der Abläufe eines Kommissioniersystems wird deshalb einerseits das Ziel verfolgt, die Leistung zu optimieren, und andererseits versucht, die Qualität der Kommissionierung (z.B. durch Vermeidung von Fehlern) zu steigern. Ein Organisationssystem lässt sich dabei in die Aufbau- (Struktur der Anordnung der Lagerbereiche), die Ablauf- (Abwicklung des Kommissionierprozesses) sowie die Betriebsorganisation (Auftragssteuerung) unterteilen (vgl. Hompel et al. 2011).

#### **2.1.3 Integration der Kommissionierung in Materialflusssystemen**

Kommissioniersysteme können innerhalb von Materialflusssystemen an unterschiedlichen Positionen zum Einsatz kommen. Für die weitere Betrachtung der Kommissionierung innerhalb der vorliegenden Arbeit ist es daher erforderlich, einen kurzen Überblick über materialfluss- und informationsflussbezogene Grenzen und Schnittstellen gegenüber vor- und nachgelagerten Bereichen zu geben.

#### **Abgrenzung und Schnittstellen**

Die Systemgrenze liegt – bezogen auf den Materialfluss – eingangsseitig vor der Bereitstellung der zu entnehmenden Güter. Dabei wird der Nachschub als unendliche Quelle angesehen, nach welchem die Kommissionierung mit der Bereitstellung von Waren beginnt. Die ausgangsseitige Schnittstelle bzw. Systemgrenze beim Materialfluss wird durch die Zuordnung der Entnahmeeinheiten zu den Kundenaufträgen abgebildet. Die Zusammenstellung von Sendungen oder Touren ist nicht mehr Bestandteil der Kommissionierung und erfolgt damit in nachgeschalteten Bereichen.

Aus Sicht des Informationsflusses bildet die Generierung von Kommissionieraufträgen aus den eingehenden Bestellungen die eingangsseitige Systemschnittstelle und damit den ersten Prozessschritt der Kommissionierung. Der letzte Prozessschritt und die ausgangsseitige Systemschnittstelle werden durch die Rückmeldung des Kommissionierers nach der Auftragsfertigstellung gebildet.

#### **Einordnung der Kommissionierung**

Bei Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette von der Beschaffung über die Produktion bis hin zur Distribution kann ein Kommissioniersystem an unterschiedlichen Stellen eines intralogistischen Materialflusssystems eingeordnet werden. Der Vorgang der Kommissionierung lässt sich dabei als Bestandteil der unternehmensinternen Logistik in die drei typischen Anwendungsgebiete der Beschaffungs-, der Produktions- und der Distributionslogistik unterteilen.

Der Anwendungsfall in der vorliegenden Arbeit lässt sich der Produktionslogistik zuordnen, deren Hauptaufgabe es ist, die Materialversorgung der Produktionsprozesse zu sichern. Deshalb sind Kommissioniersysteme in produzierenden Unternehmen in der Regel als Bindeglied zwischen dem Beschaffungslager und dem Produktionsprozess eingegliedert (siehe Abbildung 8). In diesem

Zusammenhang ist das Ziel der Kommissionierung, eine losgrößengerechte Materialbereitstellung für den oder die internen „Kunden“ in der Produktion (z.B. der Montage) sicherzustellen, um dadurch Unterbrechungen des Fertigungsablaufs zu vermeiden (vgl. Hompel et al. 2011).

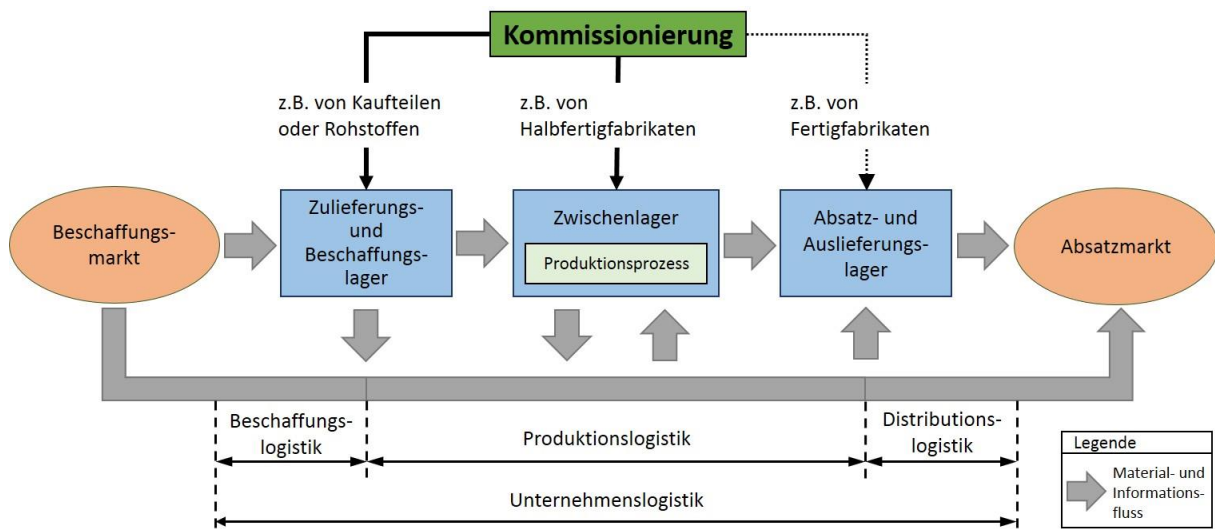


Abbildung 8: Die Kommissionierung als Bestandteil der unternehmensinternen Logistik (vgl. Jünemann 1989; Menk 1999)

### 2.1.4 Grundprinzipien der Kommissionierung

Im Zuge der auftragsbezogenen Zusammenstellung von Bedarfsmengen werden auf Basis der unterschiedlichen Zusammenführung von Kommissionierer und Gütern die beiden nachfolgenden Grundprinzipien der Person-zur-Ware- (PzW) und der Ware-zur-Person- (WzP) Kommissionierung unterschieden, wobei ersteres aufgrund des Bezugs zur vorliegenden Arbeit detaillierter ausgeführt wird.

#### **Ablauf eines konventionellen Kommissionierprozesses nach der Person-zur-Ware-Methode im industriellen Umfeld**

Das einfache, manuelle Kommissionieren mit statischer Artikelbereitstellung (auch konventionelle Kommissionierung genannt) ist aufgrund der zahlreichen Vorteile, wie z.B. des geringen technischen Aufwands oder der hohen Flexibilität gegenüber Durchsatz- und Sortimentsänderungen bis heute das am weitesten verbreitete Kommissionierverfahren (vgl. Gudehus 2012). Kennzeichnend für dieses Grundprinzip ist, dass sich der Kommissionierer beispielsweise mit Hilfe eines Kommissionierwagens (siehe dazu auch Kap. 2.1.5) durch eine Regalanlage von Entnahmeort zu Entnahmeort fortbewegt (siehe Abbildung 9). Die Übermittlung der für die Kommissionierung eines Auftrags erforderlichen Informationen (über den Artikelstandort, die Entnahmemenge und -identität sowie den Ablageort) können dabei mit Hilfe verschiedener Techniken z.B. auf Basis einer Papierliste, mit Lichtelementen an den Lagerplätzen, durch sprachgesteuerte Anweisungen oder per mobilem Datenterminal erfolgen (siehe Kap. 3.1).



Abbildung 9: Person-zur-Ware-Kommissionierung

An den einzelnen Entnahmeorten werden die im Auftrag angegebenen Artikel oder Behälter aus den Regalen entnommen und in einen Sammelbehälter bzw. auf den Kommissionierwagen abgelegt (siehe Abbildung 9). Der Entnahmevorgang für eine Auftragsposition unterteilt sich dabei in vier wesentliche Prozessschritte:

1. den Weg zum Entnahmeort,
2. die Entnahme der Artikel oder Behälter in geforderter Anzahl,
3. die Kontrolle und Quittierung der Entnahme und
4. das Ablegen der Artikel in Sammelbehälter bzw. der Behälter auf den Kommissionierwagen.

Die Quittierung der Entnahme kann dabei auf verschiedene Arten, z.B. durch Setzen eines Bestätigungshakens bei einer Papierliste oder durch Betätigen eines Quittiertasters bei Pick-by-Light, erfolgen (siehe Kap. 3.1). Je nach Anzahl der Auftragspositionen wiederholt sich der Entnahmevorgang beliebig oft.

Nach Fertigstellung eines Auftrags bewegt sich der Kommissionierer zurück zur zentralen Kommissionierbasis, an welcher der Sammelbehälter oder Kommissionierwagen abgegeben und ein neuer Auftrag gestartet sowie ein dazugehöriger Sammelbehälter bzw. Kommissionierwagen angenommen wird (vgl. Hompel et al. 2011; Wölflé 2014). Der vollständige Ablauf eines konventionellen Kommissionierprozesses nach der PzW-Methode im industriellen Umfeld ist als exemplarischer und sich wiederholender Auszug im Anhang (S. 165) dargestellt.

### ***Ablauf der Ware-zur-Person-Methode im industriellen Umfeld***

Bei der WzP-Kommissionierung werden die zu kommissionierenden Güter dem Kommissionierer an einem zentralen Entnahmeort dynamisch bereitgestellt. Dies bedeutet, dass sich der Kommissionierer für den Entnahmevorgang an einem fest vorgegebenen Ort befindet und die Kommissioniergüter zu diesem befördert werden. Für die Durchführung der Kommissionierung ist bei dieser Methode somit keine Fortbewegung des Kommissionierers erforderlich, da sich die angeforderte Ware bewegt (vgl. Hompel et al. 2011).

### **2.1.5 Technische Funktionselemente von Kommissioniersystemen**

Ein Kommissioniersystem besteht aus verschiedenen technischen Teilsystemen und Arbeitsmitteln. Für das Verständnis der vorliegenden Arbeit sind die drei folgenden technischen Funktionselemente von Bedeutung.

#### ***Lagermittel***

In der Praxis lassen sich die für die Bereitstellung der zu kommissionierenden Güter eingesetzten Lagersysteme nach ihrer Ausführung in statische oder dynamische Lagermittel einteilen. Eine statische Lagerung zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl das Lagergut als auch das Regal ortsfest sind (z.B. Fachbodenregal, siehe Abbildung 9). Bei der dynamischen Lagerung hingegen bewegt sich die Ladeeinheit nach dem Einlagern. Dabei lässt sich diese Form der Lagerung weitergehend in Ausführungen unterscheiden, bei denen die Bewegung der Ladeeinheiten in feststehenden Regalen erfolgt (z.B. Durchlaufregale), bei denen die Ladeeinheiten sich mit dem Regal bewegen (z.B. Verschieberegale) oder bei denen die Bewegung der Ladeeinheit auf einem Fördermittel mit Lagerfunktion erfolgt (z.B. Staurollenbahn).

#### ***Fördermittel***

Die Fortbewegung von Gütern oder Personen mit technischen Hilfsmitteln wird im Allgemeinen als Transport bezeichnet. Findet dieser in einem räumlich begrenzten Gebiet statt, z.B. innerhalb eines Werkes, so wird dieser Vorgang als „Fördern“ bezeichnet. Dabei umfasst die Fördertechnik alle



notwendigen technischen, organisatorischen und personellen Mittel zur Bewegung von Gütern und Personen über relativ kurze Distanzen. Ein Fördermittel ist in diesem Zusammenhang das Arbeitsmittel für den innerbetrieblichen Materialfluss. Neben dem Güter- und Personentransport kann ein Fördermittel noch für weitere Aufgaben wie z.B. zum Verteilen, Sortieren, Zwischenlagern und/oder Sammeln eingesetzt werden. In der Kommissionierung lassen sich hierbei personengeführte Fördermittel (dienen neben dem Transport der kommissionierten Ware auch zum Transport des Kommissionierers) und Fördermittel zur reinen Ortsveränderung von kommissionierten Gütern unterscheiden. Zusätzlich lassen sich Fördermittel nach der Art ihres Förderstroms in Stetig- und Unstetigförderer unterteilen. Die personengeführten Fördermittel wie z.B. Niederhubwagen oder Kommissionierstapler gehören dabei zu den Unstetigförderern. Für die reine Beförderung von kommissionierten Waren hingegen lassen sich sowohl Unstetigförderer wie z.B. verschiebbare Kommissionierwagen oder fahrerlose Transportfahrzeuge, als auch Stetigförderer wie z.B. Rollenbahnen oder Bandförderer einsetzen. Einer der bedeutendsten Unstetigförderer innerhalb der Kommissionierung ist der Kommissionierwagen (häufig auch als Etagenwagen bezeichnet). Dieser dient während der herkömmlichen PzW-Kommissionierung (siehe Abbildung 9) als Förder- und Lastaufnahmemittel und verfügt im Unterschied zu vielen anderen Fördermitteln über keinen eigenständigen Antrieb, sondern wird vom Kommissionierer geschoben. Zudem ist der Kommissionierwagen in der PzW-Kommissionierung flexibel und in individuellen Ausführungsformen einsetzbar (siehe hierzu Kap. 5.3.1), z.B. durch die Implementierung von Daten-Terminals bzw. einer Put-to-Light-Steuerung oder durch Unterteilung des Wagens in verschiedene Ebenen und Fächer.

### ***Ladehilfsmittel***

Ladehilfsmittel (auch als Ladungsträger oder Förderhilfsmittel bezeichnet) sind ein grundlegendes Betriebsmittel und ein unverzichtbarer Bestandteil der gesamten logistischen Materialflussskette. Sie dienen zur Erleichterung von Lagerung, Handling und Distribution, zum Schutz sowie zum Tragen von Produktinformationen von eingelagerten und kommissionierten Artikeln. Generell werden Ladehilfsmittel in ebene bzw. tragende (z.B. Paletten), umschließende (z.B. Behälter und Gitterboxen) und sonstige Förderhilfsmittel (z.B. Beutel) unterteilt. Als Ladehilfsmittel werden in intralogistischen Systemen häufig Behälter eingesetzt. Diese werden meist in genormter und modularer Ausführung als Kleinladungsträger (KLT) (z.B. VDA-KLT) eingesetzt. Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden nur umschließende Ladehilfsmittel bzw. verschiedene Typen von genormten KLTs verwendet (siehe Kap. 8.2.1) (vgl. Hompel et al. 2011; Koether 2014).

## **2.2 Der Mensch in der Kommissionierung**

Um die vier großen Erfolgsfaktoren der Kommissionierung: Kosten, Zeit, Qualität und Flexibilität zu erfüllen, bedarf es nicht nur eines wirtschaftlichen, schnellen und möglichst fehlerfreien, sondern immer mehr auch eines hochflexiblen Kommissioniersystems (vgl. Reif 2009). Die Einhaltung aller vier Faktoren – insbesondere einer hohen Flexibilität – ist unter den heutigen Gesichtspunkten durch Maschinen bzw. eine Automatisierung in den meisten Anwendungsfällen der Kommissionierung nicht umsetzbar. Dies zeigt sich vor allem an aktuellen Zahlen zum Automatisierungsgrad der Kommissionierung, welche mit ca. 25 % einen verhältnismäßig geringen Wert aufweist (vgl. Straube et al. 2005) (siehe Kap. 1.1). Deshalb kommt dem Menschen eine bedeutende Funktion zu, was im Folgenden näher betrachtet wird.

### 2.2.1 Unersetzlichkeit des Menschen in der Kommissionierung

Für den Einsatz eines automatischen Kommissioniersystems – ohne Mitwirkung des Menschen – sind eine hinreichende Gleichartigkeit, eine regelmäßige Form sowie eine geeignete Oberflächenbeschaffenheit der Entnahmeeinheiten unabdingbar. Darüber hinaus muss die Bereitstellung der Entnahmeeinheiten entweder einzeln oder in gleichbleibender Stapelung erfolgen, damit ein Kommissionierroboter diese zuverlässig fassen kann. Selbst wenn diese technischen Voraussetzungen erfüllt sind, ist die automatische Kommissionierung meist nur bei hoher Reproduzierbarkeit der Arbeitsaufgabe und gleichmäßig hoher Auslastung der Anlage im Mehrschichtbetrieb wirtschaftlich einsetzbar (vgl. Gudehus 2012). Diese Voraussetzungen können in der Kommissionierung jedoch aufgrund von häufig schwankenden Auftragszahlen und einer hohen Variantenvielfalt bei den zu kommissionierenden Artikeln (inkl. der Verpackung und Ladehilfsmittel) oftmals nicht sichergestellt werden.

Der Mensch hingegen bietet mit seinen kognitiven (z.B. gute räumliche Orientierung), sensorischen (z.B. visuelle Suche beim Ansteuern von Lagerplätzen) und sensomotorischen Fähigkeiten (z.B. Abzählen und Greifen auch von verhakten oder ungeordneten Artikeln) ideale Voraussetzungen auf (vgl. Günthner et al. 2014), um Kommissioniertätigkeiten wirtschaftlich, zuverlässig<sup>9</sup> und flexibel durchzuführen. Der Mensch bietet vor allem Vorteile in Systemen und bei Tätigkeiten, in denen eine hohe Flexibilität (flexibel verfügbar und einsetzbar, je nach Leistungsbedarf), Entscheidungs- und Optimierungskompetenz sowie allgemeine Erfahrungsverwertung bzw. Lernfähigkeit gefordert ist (vgl. Bokranz und Landau 2006). Des Weiteren arbeitet der Mensch im Gegensatz zu einer Maschine zielgerichtet und mit ganzheitlichem Prozessverständnis, was dazu führt, dass er ein vorgegebenes Ziel bzw. eine Arbeitsaufgabe mit verschiedenen Arbeitsmitteln und in unterschiedlicher Reihenfolge erreichen kann (siehe Abbildung 10). Zudem ist er in der Lage, Handlungsschritte zu überprüfen und diese bei Fehlern ggf. zu korrigieren, so dass sich diese nicht auf das System auswirken bzw. Folgekosten verursachen können (vgl. Crostack und Deuse 2007).

Funktionen, die eine Maschine besser bewältigen kann:	Funktionen, die ein Mensch besser bewältigen kann:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraft/Leistung bei großer Präzision</li> <li>• Exakte Wiederholung von Prozessen</li> <li>• Ja-/Nein-Entscheidungen</li> <li>• Vigilanz</li> <li>• Detektion von Signalen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilität und Improvisation</li> <li>• Strategiewechsel</li> <li>• Räumliche Wahrnehmung (Raumtiefe und Formen)</li> <li>• Prädiktion und Antizipation</li> <li>• Adaption und Lernen</li> <li>• Komplexe Entscheidungen; komplizierte, unvollkommen definierte bzw. unvorhersehbare Situationen</li> </ul>

Abbildung 10: Vergleich der Funktionen von Mensch und Maschine (vgl. Lanc 1975; Schmauder und Spanner-Ulmer 2014)

Aus diesen Gründen bietet der Mensch mit seinen Stärken der komplexen Wahrnehmungsfähigkeit (Verknüpfung verschiedener Sinnesfunktionen), der Flexibilität und der Lernfähigkeit Vorteile, welche trotz hoher Lohnkosten bis heute selbst von hochentwickelten technischen Systemen nicht übertroffen werden kann (vgl. Marquardt und Schütze 1994). Das spiegelt sich auch im geringen

<sup>9</sup> Nach Bubb wird die menschliche Zuverlässigkeit definiert als „die Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen“ (Bubb 1992, S. 61).

Automatisierungsgrad wider (vgl. Straube et al. 2005). Deshalb ist der Mensch ein elementarer Bestandteil eines Kommissioniersystems und wird es auch in naher Zukunft bleiben (vgl. Reif 2009). Um die genannten Erfolgsfaktoren der Kommissionierung mit dem Menschen zu erreichen bzw. einzuhalten, ist es zusätzlich erforderlich, dass die besonderen Anforderungen von Seiten des Menschen berücksichtigt und durch eine ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen umgesetzt werden, was nachfolgend näher erläutert wird.

### **2.2.2 Ergonomie in der Kommissionierung**

Der Begriff „Ergonomie“ ist griechischen Ursprungs und setzt sich aus den Wörtern „ergon“ (zu Deutsch: Arbeit) und „nomos“ (zu Deutsch: Gesetz oder Lehre) zusammen. Die Ergonomie stellt ein Teilgebiet der Arbeitswissenschaften dar, welches sich mit der Gestaltung von Arbeit bzw. von Arbeitssystemen und deren Bestandteilen (siehe Abbildung 7) beschäftigt. Diese Bestandteile werden nach Kriterien kategorisiert, welche sich durch die physiologischen Leistungen, die psychologischen Bedingungen und die Abmessungen des Menschen bestimmen lassen (vgl. Schlick et al. 2010). Das Ziel der Ergonomie ist es, das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren (vgl. DIN EN ISO 6385). Hierbei steht der Mensch im Mittelpunkt der Betrachtung: Er wird als Teil des gesamten Arbeitssystems verstanden, analysiert und beschrieben sowie sein Arbeitsplatz anschließend an ihn angepasst.

Um ein Arbeitsmittel wie z.B. ein Assistenzsystem zur Informationsbereitstellung unter Berücksichtigung von ergonomischen Kriterien gestalten zu können, sind Kenntnisse der durch die Arbeit auftretenden Belastungen, der daraus resultierenden Beanspruchungen für den Menschen sowie seiner Leistungsvoraussetzungen erforderlich. Darüber hinaus sind für die nutzerzentrierte Entwicklung eines kognitiven und informationstechnischen Assistenzsystems (siehe Kap. 2.5 und Kap. 2.4.2) grundlegende Kenntnisse über den Informationsfluss zwischen Mensch und Arbeitsmittel bzw. über die menschliche Informationsaufnahme und -verarbeitung von Bedeutung.

#### ***Das Belastungs- und Beanspruchungsmodell***

Die Abwicklung eines Kommissionierauftrags stellt äußere Anforderungen an den Kommissionierer, die sich in Abhängigkeit von den jeweils vorliegenden Arbeitsbedingungen in Form einer Arbeitsbelastung auswirken. Diese äußeren Faktoren setzen sich aus der Arbeitsaufgabe (z.B. Lesen einer Kommissionierliste), der Arbeitsorganisation (z.B. Interaktion zwischen Mensch und Betriebsmittel) sowie der Arbeitsumgebung (z.B. Beleuchtung, Klima etc.) zusammen und bestimmen die Höhe der einwirkenden Belastung, die rein objektiv ist (vgl. Mackowiak und Goldscheid 2005). Für die quantitative Erfassung der Intensität und Dauer einer Belastung werden die Begriffe Belastungshöhe und -dauer verwendet. Daraus ergibt sich die tatsächliche Belastung eines Kommissionierers, beispielsweise aus der Zeitspanne (Belastungsdauer), in welcher er eine gewisse Last (Belastungshöhe) ertragen muss. Demgegenüber bezeichnet der Begriff der Beanspruchung die Folge der Belastung, die abhängig von den individuellen Eigenschaften des Kommissionierers ist. Dies bedeutet, dass die gleiche Belastung bei verschiedenen Menschen zu einer unterschiedlichen Beanspruchung führt. Dieser Zusammenhang der Wirkung von Arbeit (als Belastung) auf den Menschen ist exemplarisch anhand des Belastungs- und Beanspruchungsmodells in Abbildung 11 dargestellt. In diesem Modell sind die individuellen Leistungsvoraussetzungen als Feder mit spezifischer Federsteifigkeit für den einzelnen Menschen abgebildet (vgl. Hompel et al. 2011). Die Zusammensetzung dieser Leistungsvoraussetzungen wird nachfolgend näher erläutert (siehe Abbildung 12).

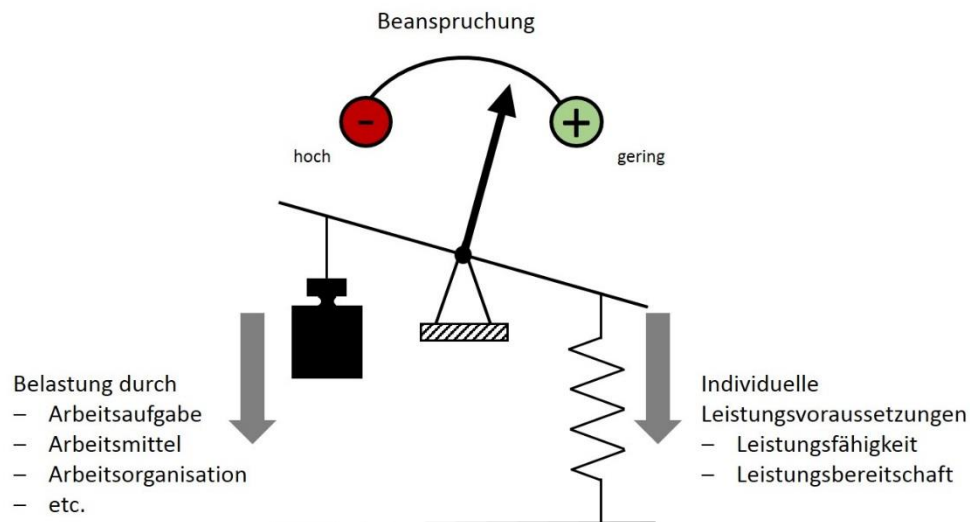


Abbildung 11: Mechanisches Modell der Belastung und Beanspruchung (vgl. Schmauder und Spanner-Ulmer 2014; Hompel et al. 2011)

### Leistungsbeeinflussende Faktoren in der Kommissionierung

Die Arbeitsleistung wird in der Ergonomie als Gesamtheit von Energieumsatz und Informationsverarbeitung zur Erreichung eines geforderten Aufgabenzieles betrachtet. Zur Ermöglichung dieser Arbeitsleistung sind neben den sachlichen Leistungsvoraussetzungen, also den organisatorischen und technischen Vorbedingungen vor allem menschliche Leistungsvoraussetzungen zu erfüllen (siehe Abbildung 12). Dabei besitzt jeder Mensch individuelle Leistungsvoraussetzungen, die er den an ihn gestellten Anforderungen entgegensetzt bzw. die die Belastung und die Beanspruchung miteinander verknüpfen (siehe Abbildung 11).

Die menschlichen Leistungsvoraussetzungen lassen sich in die Aspekte der Leistungsfähigkeit und der -bereitschaft unterteilen. Diese beiden Aspekte weisen eine physische und eine psychische Komponente auf. Zudem sind die menschlichen Leistungsvoraussetzungen nicht konstant, sondern werden von mehreren Faktoren beeinflusst, welche physischen als auch psychischen Ursprungs sein können (vgl. Schmauder und Spanner-Ulmer 2014).

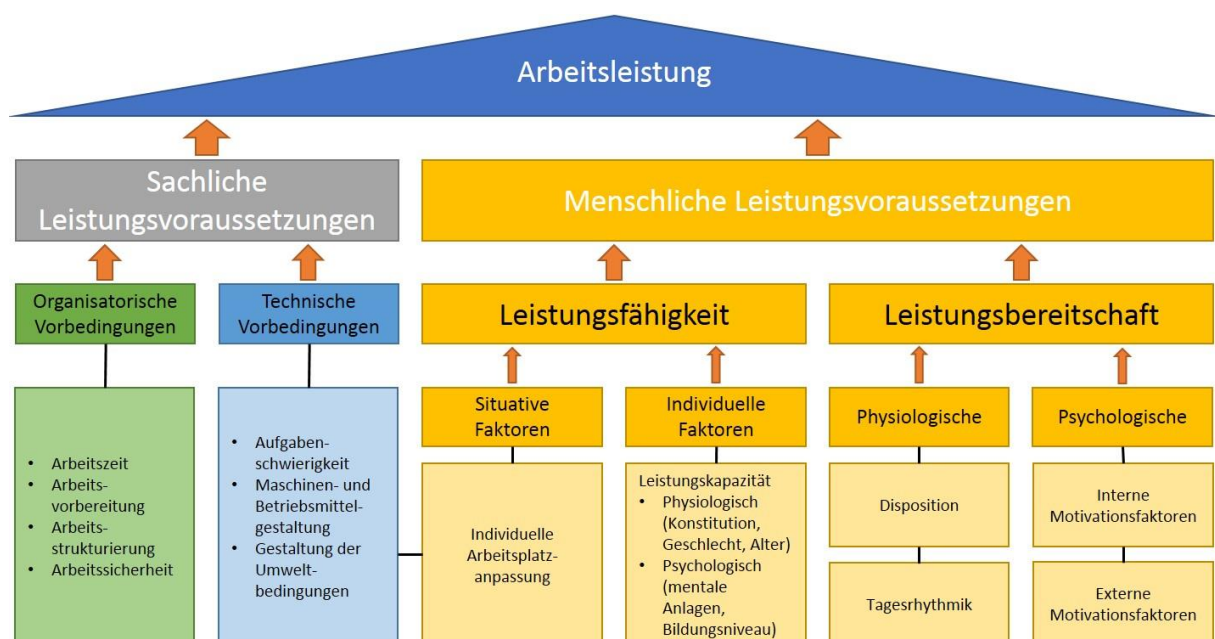


Abbildung 12: Der Leistungsbegriff in der Ergonomie (vgl. Schmidtke und Bernotat 1993)

Aus diesen allgemeinen Leistungsvoraussetzungen lassen sich speziell für die Arbeitsaufgabe der Kommissionierung (mit den Kernelementen der Aufbau-, Ablauf- und Betriebsorganisation) zwei leistungs- und fehlerbeeinflussende Hauptfaktoren ableiten, welche in Abbildung 13 als „tragende Säulen“ für die Kommissionierleistung und -fehler dargestellt sind: die Arbeits- und Umgebungsbedingungen sowie die Leistungsvoraussetzungen des menschlichen Kommissionierers.

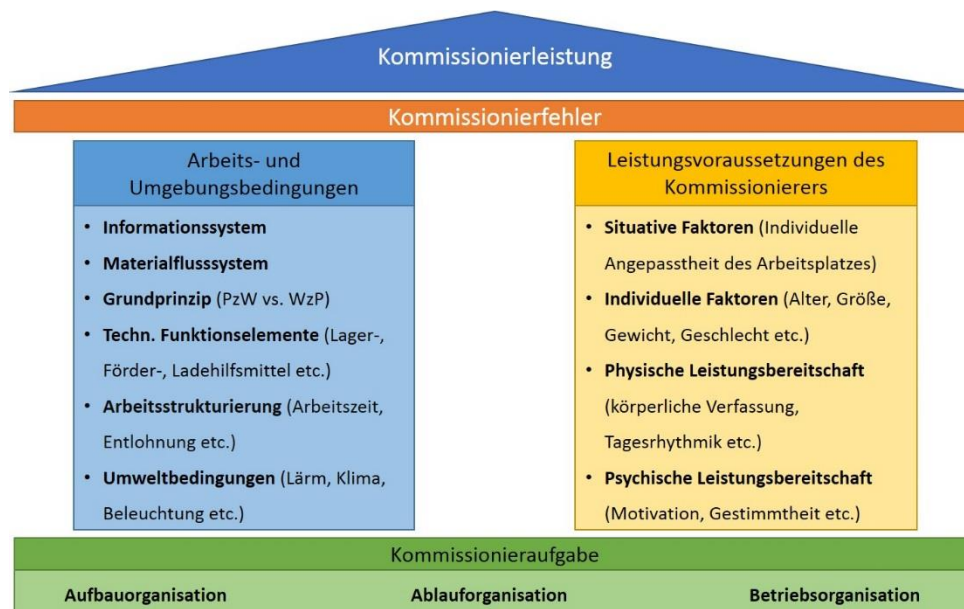


Abbildung 13: Leistungs- und fehlerbeeinflussende Faktoren in der Kommissionierung (vgl. Menk 1999)

### **Ergonomische Gestaltung der Informationsübertragung im Mensch-Maschine-System**

Das Wissen über die Fähigkeiten, aber auch die Grenzen des Menschen als Kommunikationspartner in einem Arbeitssystem stellt eine elementare Voraussetzung für die Entwicklung eines kognitiven und informationstechnischen Unterstützungssystems dar. Insbesondere für die Gestaltung des Bedien- und Anleitungssystems, welches den Zweck hat, den Informationsaustausch zwischen dem Kommissionierer und dem Assistenzsystem zu gewährleisten (siehe Kap. 5.3.2 und Kap. 6.5), sind grundlegende Kenntnisse über den Informationsfluss beim Menschen erforderlich.

Die Aufgabenerfüllung durch den Menschen innerhalb der Kommissionierung lässt sich grundlegend in die drei Phasen der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung untergliedern.

Die gerichtete Informationsübertragung von einer technischen Einrichtung zum Menschen erfolgt über Anzeigen, die über die Zustände des technischen Systems, Arbeitsmittels oder Prozesses informieren. Die Aufnahme dieser Informationen erfolgt über die menschlichen Rezeptoren bzw. Sinnesorgane. Anschließend werden diese über die Nervenbahnen ans Gehirn weitergeleitet, verarbeitet und schlussendlich die als sinnvoll ausgewählten Reaktionen entweder durch Bewegung von Extremitäten (Finger, Hände, Füße etc.) oder durch Sprache in Handlungen umgesetzt und an den Prozess oder das technische System zurückgeführt. Hierbei ist vor allem wichtig zu erwähnen, dass der Mensch über 80 % der Informationen durch den optischen Sinneskanal aufnimmt und deshalb die visuelle Informationsdarstellung besondere Vorteile (z.B. einer einfachen und fehlerfreien Informationsaufnahme) bietet bzw. unterstützt (vgl. Weineck 2010; Schenk und Rigoll 2010). In Abbildung 14 ist der Informationsfluss des Menschen sowie einer technischen Einrichtung als Strukturschema eines Mensch-Maschine-Systems abgebildet (vgl. Schmauder und Spanner-Ulmer 2014; Schlick et al. 2010).

Bei Betrachtung sowohl des hohen Informationsaufkommens in komplexen Mensch-Maschine-Systemen, wie z.B. in der Fahrzeug- und Prozessführung, als auch der begrenzten Informationsverarbeitungskapazitäten des Menschen kann festgestellt werden, dass die menschliche Informationsverarbeitungsfähigkeit selbst bei ergonomisch günstiger Gestaltung an ihre Grenzen kommen kann. Der Mensch in seiner Eigenständigkeit weist bekanntermaßen sowohl erhebliche intra- und interindividuelle Leistungsschwankungen als auch (insbesondere unter Zeitdruck) eine geringe Handlungszuverlässigkeit auf. Deshalb ist es erforderlich, den Menschen durch ein technisches Arbeitsmittel wie z.B. ein Assistenzsystem ausgewogen zu unterstützen, ihn jedoch dadurch nicht zu ersetzen (vgl. Schlick et al. 2010).

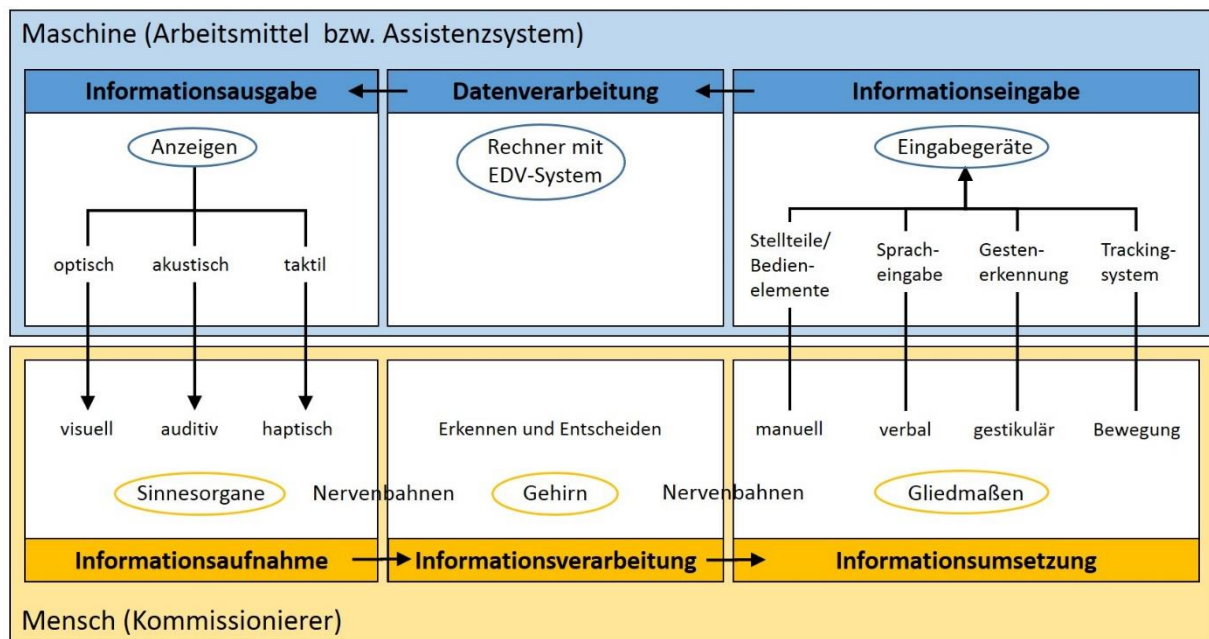


Abbildung 14: Informationsübertragung im Mensch-Maschine-System (der Kommissionierung) (vgl. Schlick et al. 2010; Lolling 2003)

## 2.3 Menschen mit Behinderung

Nachfolgend wird erläutert, wie sich anhand vorliegender gesetzlicher Rahmenbedingungen Menschen mit Behinderung beschreiben lassen. Des Weiteren wird die in der vorliegenden Arbeit relevante Behinderungsart der geistigen Behinderung näher erläutert. Im Anschluss werden die normativen Grundlagen zur Teilhabe am Arbeitsleben von Menschen mit Behinderung geschildert, wobei der Fokus auf dem geschützten Arbeitsmarkt liegt. Anknüpfend daran wird die Bedeutung und Funktion von Arbeit für Menschen mit geistiger Behinderung erläutert. Abschließend wird auf die Forschungslage im Kontext von Menschen mit geistiger Behinderung und auf den Einbezug der Zielgruppe in den Forschungsprozess verwiesen.

### 2.3.1 Internationale und nationale Klassifikation des Behinderungsbegriffes

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) entwickelte 1980 eine dreidimensionale Klassifikation, um eine international einheitliche Definition für den Begriff „Behinderung“ sicherzustellen. Diese primär medizinisch orientierte Klassifikation beinhaltet die damalige Definition anhand der Begriffe „Impairment“ (zu Deutsch: Schädigung), „Disability“ (zu Deutsch: Fähigkeitsstörung) und „Handicap“ (zu Deutsch: Beeinträchtigung). Diese Klassifikation mit dem Namen „International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps“ (ICIDH, zu Deutsch: Internationale Klassifikation der



Schädigung, Behinderungen und Beeinträchtigungen) beruht auf einem störungs- und defizitorientierten Ansatz. Aufgrund der negativ konnotierten Begriffe sowie der Nichtberücksichtigung von Umweltfaktoren und Lebenshintergrund der Betroffenen innerhalb der Klassifikation wurde diese weiterentwickelt und 2001 durch die „International Classification of Functioning, Disability and Health“ (ICF, zu Deutsch: Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit) neu verabschiedet (vgl. DIMDI 2005).

Mit dieser neuen Fassung wird versucht, sich nicht mehr an Defiziten zu orientieren, sondern die Teilhabe an verschiedenen Lebensbereichen zum Ziel und somit zum Mittelpunkt aller Bemühungen zu machen. Darüber hinaus dient sie zur Beschreibung und Einteilung des funktionalen Gesundheitszustandes einer jeden Person und der damit verbundenen Umgebungsfaktoren und -situationen. Zudem ist sie universell auf alle Menschen, unabhängig von etwaigen Behinderungen, anwendbar. Sie versucht „in einheitlicher und standardisierter Form eine Sprache und einen Rahmen zur Beschreibung von Gesundheits- und mit Gesundheit zusammenhängenden Zuständen zur Verfügung zu stellen“ (DIMDI 2005, S. 9).

Unter dem Gesichtspunkt des Körpers, des Individuums und der Gesellschaft unterteilt sich die ICF in zwei Teile, die jeweils wiederum aus zwei Unterkomponenten bestehen:

„Teil 1: Funktionsfähigkeit und Behinderung

- (a) Körperfunktionen und -strukturen
- (b) Aktivitäten und Partizipation [Teilhabe]

Teil 2: Kontextfaktoren

- (c) Umweltfaktoren
- (d) Personenbezogene Faktoren“ (DIMDI 2005, S. 17).

Demnach werden mit der ICF keine Behinderungen klassifiziert, sondern vielmehr Funktionsfähigkeiten berücksichtigt bzw. Bereiche beschrieben, in denen Behinderungen entstehen können. Somit ist nicht mehr nur eine gesundheitliche Beeinträchtigung die Ursache für eine Behinderung, sondern neben dem Gesundheitszustand einer Person werden deren Umwelt- und personenbezogene Faktoren gesehen, welche eine Teilhabe an unterschiedlichen Lebensbereichen verhindern können (vgl. Rose 2007). Die Berücksichtigung des Einflusses gesellschaftlicher Rahmenbedingungen auf die Handlungs- und Teilhabemöglichkeiten von Menschen mit Behinderungen bedeutet einen inhaltlichen Fortschritt und einen Perspektivenwechsel im Vergleich zu früheren Klassifikationen.

Es wird deutlich, dass die Definition des Behinderungsbegriffes innerhalb der ICF als Oberbegriff aufgefasst wird und somit deutlich umfassender als die national – im Sozialgesetzbuch IX – verankerte Behinderungsdefinition ist.

In der Bundesrepublik Deutschland (BRD) sind die Gesetzesgrundlagen des Neunten Sozialgesetzbuches grundlegend für die Eingliederungshilfe und die berufliche Teilhabe. Darin werden zwar wesentliche Inhalte der ICF aufgegriffen, aber nicht weiter differenziert. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird innerhalb des deutschen Sozialbereichs – sowie in der vorliegenden Arbeit – ausschließlich der Behinderungsbegriff des SGB IX verwendet, der in § 2 Abs. 1 wie folgt definiert ist:

„(1) Menschen sind behindert, wenn ihre körperliche Funktion, geistige Fähigkeit oder seelische Gesundheit mit hoher Wahrscheinlichkeit länger als sechs Monate von dem für das Lebensalter typischen Zustand abweichen und daher ihre Teilhabe am Leben in der Gesellschaft beeinträchtigt ist. Sie sind von Behinderung bedroht, wenn die Beeinträchtigung zu erwarten ist“.

Hierbei wird, neben der Berücksichtigung von körperlichen, seelischen oder geistigen Defiziten, die Möglichkeit der Teilhabe an verschiedenen Lebensbereichen in den Mittelpunkt gerückt.

### **2.3.2 Nutzergruppe des beschriebenen Assistenzsystems: Menschen mit geistiger Behinderung**

Das vorhergehende Kapitel zeigt, wie unterschiedlich und ausdifferenziert Behinderung begriffen werden kann und wie sehr Behinderung eine politisch zu definierende Kategorie ist (vgl. Maschke 2008). Ebenso kann in den letzten Jahrzehnten auf nationaler und internationaler Ebene ein Wandel des Behinderungsbegriffs beobachtet werden, der unter dem Schlagwort „Paradigmenwechsel“ diskutiert wird. Dieser Wandel bezieht sich auf ein sich veränderndes Verständnis von Behinderung, ein Umdenken in den Vorstellungen über den Ort und Inhalt der Unterstützungsleistungen sowie auf die sich wandelnde Rolle von Menschen mit verschiedenen Behinderungsarten in der Gesellschaft (vgl. Schädler 2003).

Im Folgenden kann aus Relevanzgründen nicht auf alle Behinderungsarten (geistig, psychisch und körperlich) eingegangen werden. Aufgrund der Ergebnisse der empirischen Untersuchung in Kapitel 4.2.2 wird lediglich die Gruppe der Menschen mit einer geistigen Behinderung näher betrachtet.

Das Hauptproblem bei der Definition des Begriffs „geistige Behinderung“ ist, dass Aussagen oftmals nur „über“ Menschen mit einer geistigen Behinderung getroffen werden können, da diese sich selbst nicht umfassend ausdrücken können (vgl. Schmid 2003). Zudem lässt sich nach Otto Speck der Geist eigentlich nicht behindern (vgl. Speck 1999). Trotzdem existiert seit Gründung der „Elternvereinigung für das geistig behinderte Kind e.V.“ im Jahr 1958 der Begriff der „geistigen Behinderung“. Nach Speck dient dieser Begriff zur Kennzeichnung von Menschen, die aufgrund komplexer Dysfunktionen der hirneuralen Systeme nicht in der Lage sind, ihr Leben eigenständig zu führen. Diese Personengruppe ist deshalb lebenslang auf besondere Hilfe, Förderung und Begleitung angewiesen. Die explizite Definition birgt jedoch auch die Gefahr der sozialen Abwertung, Benachteiligung und des Ausschlusses dieses Personenkreises, weshalb der Begriff umstritten ist. Im rechtlichen und wissenschaftlichen Bereich wird jedoch nach wie vor der Fachausdruck „geistige Behinderung“ verwendet (vgl. Speck 2013).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Ansätze, diesen mehrheitlich von Eltern und nicht von Experten eingeführten Begriff zu klassifizieren. Je nach fachlichem Hintergrund verwenden Mediziner, Psychologen und Pädagogen unterschiedliche Bezugs- und Abgrenzungsmerkmale. Die medizinisch-biologischen Disziplinen orientieren sich an physischen und organisch-genetischen Abweichungen. Im verhaltenswissenschaftlichen Bereich der Psychologie werden Eigenheiten von Verhaltensweisen beobachtet, während die pädagogische Sichtweise den Einfluss der Erziehung in den Vordergrund stellt. Anhand dieser unterschiedlichen Disziplinen wird klar, wie vielfältig die Vorstellungen und Verständnisse des Gegenstandes sind.

Für die vorliegende Arbeit wird die geistige Behinderung unter anderem durch die Klassifikationsmöglichkeiten der Ätiologie sowie des vorherrschenden Lernverhaltens oder der Bestimmung des Intelligenzquotienten, der Ermittlung der sozial-adaptiven Kompetenz bzw. des Förder- und Hilfebedarfs unterschieden und betrachtet (vgl. Sarimski 2001).

Den Ausgangspunkt für die Entstehung einer geistigen Behinderung bilden biologisch-organische Beeinträchtigungen. Dies können klinische Syndrome bzw. Hirnschädigungen sein, welche pränatal z.B. durch Genmutationen oder Infektionen, perinatal z.B. durch ein Geburtstrauma oder eine Frühgeburt oder postnatal z.B. durch entzündliche Erkrankungen oder Hirntumore verursacht sind (vgl. Neuhäuser et al. 2013). Der weitere Entwicklungsverlauf der Beeinträchtigten ist vom Schweregrad der Hirnschädigung, aber auch von individuellen und sozialen Entwicklungs- und Aufwuchsbedingungen



abhängig. Die genetisch-organischen Schädigungen wirken sich vor allem auf das Intelligenzniveau aus und dadurch auch auf die Wahrnehmung und Kognition, die Sprache sowie die motorische und soziale Entwicklung. Meist sind mehrere Funktionen des Organismus betroffen, weshalb man generell von einer Mehrfachbehinderung spricht. Zusätzlich können bei geistigen Behinderungen auch psychophysische Beeinträchtigungen wie z.B. Autismus oder Körperbehinderungen auftreten. Die individuelle Ausprägung einer geistigen Behinderung ist jedoch wesentlich von der Sozialisation wie z.B. der pädagogischen Förderung und einer sozialen Eingliederung abhängig (vgl. Speck 2013).

### **2.3.3 Gesetzliche Grundlagen zur Teilhabe an Arbeit von Menschen mit Behinderung**

Die Gewährleistung einer umfassenden gesellschaftlichen Teilhabe ist für alle Menschen innerhalb der BRD ein politisch anerkanntes Ziel (siehe Kap. 2.3.1), welches gesetzlich verankert ist und nachfolgend näher beschrieben wird.

Neben dem SGB finden sich in der deutschen Gesetzgebung weitere Gesetze und Regelungen, die Rechte und Themen rund um Menschen mit Behinderung aufgreifen. So hat u.a. im Jahr 1994 mit der Aufnahme des Benachteiligungsverbots durch Ergänzung von Artikel 3 Abs. 3 Satz 2 des Grundgesetzes um den Satz „Niemand darf wegen seiner Behinderung benachteiligt werden“ ein Paradigmenwechsel in der Behindertenpolitik in Deutschland begonnen (siehe Kap. 2.3.1). Nachfolgend wurden im Jahr 2001 auf Bundesebene das SGB IX und im Jahr 2002 das Behindertengleichstellungsgesetz (BGG) verabschiedet. Dabei legte das SGB IX den Grundstein für ein bürgernahes Rehabilitations- und Teilhaberecht, welches den Antragstellern den Zugang zu Leistungen erleichtern und beschleunigen soll.

Das BGG hingegen regelt die Gleichstellung von Menschen mit Behinderung im Bereich des öffentlichen Rechts, wie beispielsweise die Umsetzung der Barrierefreiheit im umfassenden Sinne.

Im Jahr 2006 trat schließlich das Allgemeine Gleichbehandlungsgesetz (AGG) in Kraft, welches Menschen im Arbeitsleben und Zivilrechtsverkehr unter anderem vor Diskriminierung aufgrund einer Behinderung schützt.

Seit 2009 ist das „Übereinkommen der Vereinten Nationen über die Rechte von Menschen mit Behinderungen“ für Deutschland verbindlich. Mit der Ratifizierung wurde dieses geltendes Recht und eine wichtige Leitlinie für die Behindertenpolitik innerhalb der BRD. Das Ziel dieser modernen Behindertenpolitik ist die Verwirklichung eines menschenwürdigen und selbstbestimmten Lebens in einer inklusiven Gesellschaft (vgl. Beauftragte der Bundesregierung für die Belange behinderter Menschen 2014).

Für die Umsetzung einer umfassenden gesellschaftlichen Teilhabe spielt besonders die Einbeziehung aller Menschen in das Arbeitsleben eine bedeutende Rolle (vgl. Frehe 2005), wie insbesondere § 33 bis 43 des neunten Sozialgesetzbuches und Artikel 27 der UN-BRK verdeutlichen.

Seit Inkrafttreten der UN-BRK ist ein deutlicher Umbruch im System der beruflichen Teilhabe von Menschen mit Behinderung zu beobachten. Dieser ist vorrangig fiskalisch-betriebswirtschaftlich geprägt, so dass politische Leitlinien eine Tätigkeit auf dem allgemeinen Arbeitsmarkt nahezu uneingeschränkt als das einzige Ziel beruflicher Teilhabe proklamieren und dadurch den höchsten Grad an Selbstbestimmung und Normalität garantiert sehen. Hierbei fehlt es allerdings an einer differenzierten Betrachtung der Rahmenbedingungen für eine mögliche Erwerbstätigkeit auf dem allgemeinen Arbeitsmarkt, speziell für die Zielgruppe von Menschen mit geistiger Behinderung.

Noch immer ist eine Teilhabe am Arbeitsleben für einige Personengruppen, insbesondere für Menschen mit geistiger Behinderungen, nicht verwirklicht. Das angestrebte Ziel einer umfassenden gesellschaftlichen Teilhabe und somit auch der Teilhabe an Arbeit, wie es in der UN-BRK und im SGB

IX ausdrücklich formuliert ist, stellt damit eine bis heute ungelöste Herausforderung von gesamtgesellschaftlichem Ausmaß dar.

Die vorliegende Arbeit interpretiert die berechtigten Forderungen nach Teilhabe an Arbeit im Licht der gegebenen Bedingungen und stellt Inklusionsbemühungen durch ein technisches Unterstützungssystem innerhalb von Werkstätten für Menschen mit geistiger Behinderung vor, um eine Teilhabe auch für diese Personengruppen zu ermöglichen.

Der Einsatz des zu entwickelnden Assistenzsystems soll eine praktikable Lösung zur Teilhabe an Arbeit von Menschen mit geistiger Behinderung darstellen, denen aufgrund schwerer Beeinträchtigung und unter den bisherigen Bedingungen kein Wechsel auf den allgemeinen Arbeitsmarkt möglich ist und die deshalb in WfbMs beschäftigt werden müssen.

#### **2.3.4 Werkstatt für behinderte Menschen**

Eine WfbM ist nach § 136 des SGB IX eine Einrichtung zur Teilhabe behinderter Menschen am Arbeitsleben und zur Eingliederung in das Arbeitsleben. Demnach sind Werkstattbeschäftigte „behinderte Menschen, die wegen Art oder Schwere der Behinderung nicht, noch nicht oder noch nicht wieder auf dem allgemeinen Arbeitsmarkt beschäftigt werden können [...] sofern erwartet werden kann, dass sie [...] wenigstens ein Mindestmaß wirtschaftlich verwertbarer Arbeitsleistung erbringen werden“ (§ 136, SGB IX). Die WfbMs haben zudem die Verpflichtung, ihren Beschäftigten „eine Beschäftigung zu einem ihrer Leistung angemessenen Arbeitsentgelt aus dem Arbeitsergebnis anzubieten und zu ermöglichen, ihre Leistungs- oder Erwerbsfähigkeit zu erhalten, zu entwickeln, zu erhöhen oder wiederzugewinnen und dabei ihre Persönlichkeit weiterzuentwickeln“ (§ 136, SGB IX).

Vor allem für Menschen mit geistiger Behinderung ist die Arbeit in einer WfbM die gängigste Form der Beschäftigung. Laut der Bundesarbeitsgemeinschaft Werkstätten für behinderte Menschen e.V. gab es zu Beginn des Jahres 2011 bundesweit 721 WfbMs, welche ein Gesamtangebot von 297.293 Werkstattplätzen bereitstellten. Dabei betrug der Anteil der Werkstattbeschäftigten mit einer geistigen Behinderung 77,5 %, der Beschäftigten mit einer psychischen Behinderung 19,2 % und der Beschäftigten mit einer körperlichen Behinderung 3,3 % (vgl. bagwfbm 2013).

Die WfbMs verfügen meist über ein breites Angebot an Berufsbildungs- und Arbeitsplätzen mit typischen Arbeitsfeldern, wie beispielsweise Montage, Kommissionierung, Verpackung, Versand, Druck, Holzverarbeitung, Garten- und Landschaftspflege, Küchenservice und Wäscherei. Die Mehrheit der Arbeitsplätze befindet sich nicht in Betrieben des allgemeinen Arbeitsmarktes, sondern in Räumlichkeiten der WfbMs. Zusätzlich gibt es aber auch betriebliche Arbeitsangebote in Form von Außenarbeitsplätzen, die sich extern in den Räumlichkeiten von Unternehmen befinden, jedoch arbeitspädagogisch durch eine WfbM betreut werden. Die Vorteile dieser Organisationsform sind die große Nähe zur betrieblichen Realität und die Chance für eine soziale Integration durch die Zusammenarbeit mit nichtbehinderten Kollegen (vgl. Doose 2012).

Durch eine mehrheitlich produktionsorientierte Aufgabenstellung und die Anforderung, als profitables Unternehmen zu bestehen, unterliegen die Werkstätten jedoch zunehmend auch ökonomischen Zwängen (vgl. Schmid 2003). Mehr noch: WfbMs – insbesondere die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Werkstatt – stellen aufgrund der „Echtarbeit“ (Kubek 2012, S. 33) wirtschaftsnahe und marktorientierte Produktionsstätten dar, die sich nur auf einen zweiten Blick vom allgemeinen Arbeitsmarkt unterscheiden (vgl. Seyl 1996). Jacobs und Welter verweisen bereits 1992 auf die Struktur- und Konzeptheterogenität von WfbMs: „Es gibt nicht *die* Werkstatt, die Werkstätten unterscheiden sich vielmehr in ihrer Gestaltung und ihrer Ausprägung. Vergleicht man anerkannte

Werkstätten, so sind diese – obwohl sie demselben rechtlichen Modell unterliegen – dennoch alle unterschiedlich“ (Jacobs und Welter 1992, S. 3).

Durch eine adäquate Unterstützung des zu entwickelnden Assistenzsystems soll auch den Menschen mit Behinderung, denen eine Eingliederung in den allgemeinen Arbeitsmarkt aus unterschiedlichsten Gründen nicht gewährleistet werden kann, die Teilhabe am Arbeitsleben ermöglicht werden. Welche Bedeutung und Funktion die Befähigung zur Arbeit für Menschen mit Behinderung hat, wird nachfolgend erläutert.

### **2.3.5 Bedeutung und Funktion von Teilhabe an Arbeit für Menschen mit Behinderung**

Friedrich Schiller beschreibt in seinem Gedicht „Lied von der Glocke“ die Arbeit als des „Bürgers Zierde“, welche ein Garant für Fortschritt, Vernunft und Wohlfahrt ist. Früher galt es oftmals als Privileg, nicht arbeiten zu müssen, heute hingegen ist es eher ein Privileg, arbeiten zu dürfen (vgl. Zwierlein 1997). Dabei versteht der Arbeitswissenschaftler Rohmert unter Arbeit alles, „was der Mensch zur Erhaltung seiner Existenz und/oder der Gesellschaft tut, soweit es von der Gesellschaft akzeptiert und honoriert wird“ (Rohmert 1993, S. 120). Neben dieser Ausrichtung auf objektive Zielsetzungen dient Arbeit subjektiven Zwecken und stiftet besonderen Sinn für den Menschen. Diesen besonderen Aspekt greift Papst Johannes Paul II. in der Enzyklika *Laborem Exercens* „Über die menschliche Arbeit“ auf und definiert: „*Die Arbeit ist eines der Kennzeichen, die den Menschen von den anderen Geschöpfen unterscheiden, deren mit der Erhaltung des Lebens verbundene Tätigkeit man nicht als Arbeit bezeichnen kann; nur der Mensch ist zur Arbeit befähigt, nur er verrichtet sie, wobei er gleichzeitig seine irdische Existenz mit ihr ausfüllt*“ (Papst Johannes Paul II. 1981, S. 3).

Arbeit – insbesondere Erwerbsarbeit – erfüllt verschiedene Funktionen. Sie

- dient zur materiellen Existenzsicherung,
- ist bedeutend für das Grundbedürfnis nach Sicherheit,
- hat eine (tages)strukturierende Funktion,
- hat durch die Kommunikation und Kooperation mit anderen Menschen eine soziale Funktion,
- ist bedeutend für den sozialen Status und die soziale Anerkennung,
- ist Aktivität und kann dadurch großen Einfluss auf das Selbstwertgefühl und die eigene Identität haben und
- schafft Gelegenheit zur Selbstverwirklichung sowie Weiterentwicklung der Persönlichkeit (vgl. Doose 2012; Schubert 1996).

Für die Unterscheidung der subjekt- und der objektorientierten Sichtweise von Arbeit finden sich in vielen Sprachen zwei unterschiedliche Begriffe, wie z.B. „work“ und „labour“ im Englischen oder „œuvre“ und „travail“ im Französischen. Im Deutschen steht der eine Begriff „Arbeit“ im ursprünglichen subjektbezogenen Sinn für Anstrengung und im objektbezogenen Sinn für die Produktion von Gütern oder Dienstleistungen.

Diese Unterscheidung ist zudem ein wesentliches Merkmal der Arbeitswissenschaft, denn dieses Fachgebiet betrachtet neben den objektiven Bedingungen die subjektiven Aspekte von Arbeit. Die wesentliche Zielsetzung der Arbeitswissenschaften ist dabei, dass Arbeit sowohl menschengerecht (human) als auch effektiv und effizient (rational) gestaltet sein soll (vgl. Schlick et al. 2010) (siehe Kap. 5.2.1).

Die Teilhabe an Arbeit hat für Menschen mit Behinderung – trotz der meist fehlenden Wahlmöglichkeit des Arbeitgebers – eine vergleichbar hohe Bedeutung ebenso wie für nichtbehinderte Menschen. Unterschiede ergeben sich im Stellenwert einzelner Funktionen der Arbeit, wobei neben individuellen

Besonderheiten die Art und das Ausmaß der Behinderung eine wesentliche Rolle spielen (vgl. Schubert 1996).

In Anbetracht der Zielgruppe der vorliegenden Arbeit beziehen sich die folgenden Ausführungen primär auf die Bedeutung und Funktion von Arbeit für Menschen mit geistiger Behinderung.

Bisher haben Menschen mit einer geistigen Behinderung in Deutschland meist nur die Möglichkeit, in einer WfbM erwerbstätig zu sein (vgl. Seyl 1996) (siehe Kap. 2.3.4).

Werkstattarbeit bietet auch dieser Personengruppe die Möglichkeit, den Lebensunterhalt teilweise durch eigene Kraft zu finanzieren und dadurch wirtschaftliche Stabilität und Selbstbestimmtheit zu erlangen. Auch tragen Menschen mit geistiger Behinderung durch ihre Tätigkeit zur Wirtschaftskraft des Landes bei. Arbeit bietet diesen Menschen die Möglichkeit, vorhandene Fähigkeiten und Leistungen sinnvoll und nutzbringend einzusetzen, weiterzuentwickeln und dadurch das Selbstwert- und Zugehörigkeitsgefühl zu stärken. Für diese Personengruppe stellt Arbeit meist einen wichtigen Lebensinhalt dar, welcher wesentlich zur Erfüllung, zur Zufriedenheit und zum Glücklichsein beiträgt. Schubert verweist darauf, dass Arbeit für Menschen mit geistiger Behinderung auch gezielt therapeutische Effekte besitzen kann (vgl. Schubert 1996). Durch die Teilhabe an der Arbeitswelt erhalten Menschen mit Behinderung zusätzliche zwischenmenschliche Kontakte, welche die soziale Integration und Teilhabe verbessern. Eine Arbeit ausführen zu können, vermittelt insbesondere Menschen mit einer geistigen Behinderung das Gefühl, nützlich und wertvoll zu sein. Am Arbeitsleben teilzuhaben bedeutet im Wesentlichen auch, in den größeren gesellschaftlichen Kontext des Wirtschafts- und Soziallebens eingebunden zu sein (vgl. Brackhane 1996).

Abschließend kann festgehalten werden, dass für Menschen mit geistiger Behinderung die Teilhabe an Arbeit, gerade unter Berücksichtigung ihrer eingeschränkten Möglichkeiten zur Lebensgestaltung, sogar einen deutlich höheren Stellenwert hat als für Menschen ohne Behinderung. Über die organisierte institutionelle Eingliederung, das Ansehen und die Arbeitsergebnisse der Werkstätten, die durch das zu entwickelnde Assistenzsystem verbessert werden sollen, können gerade Menschen mit geistiger Behinderung gesellschaftliche Anerkennung erleben, die ihnen als individuelle Personen leider oftmals nicht entgegengebracht wird (vgl. Seyl 1996; Schubert 1996).

### 2.3.6 Forschung im Kontext von Menschen mit geistiger Behinderung

Elementarer Bestandteil dieser Arbeit ist es, die Zielgruppe der Menschen mit geistiger Behinderung in den Forschungsprozess mit einzubeziehen und daran partizipieren zu lassen, um damit einen weiteren wichtigen Schritt im Zuge des Wandels der Forschung im Kontext geistiger Behinderung (von „an“ nach „von“, siehe Abbildung 15) zu gehen (vgl. Wüllenweber 2006). Die Inhalte der vorliegenden Arbeit stellen damit einen wichtigen Beitrag im Bereich der Forschung „für“ und „mit“ Menschen mit geistiger Behinderung, insbesondere in technischen Disziplinen, dar (siehe Kap. 8.1.4 und Kap. 8.1.7).

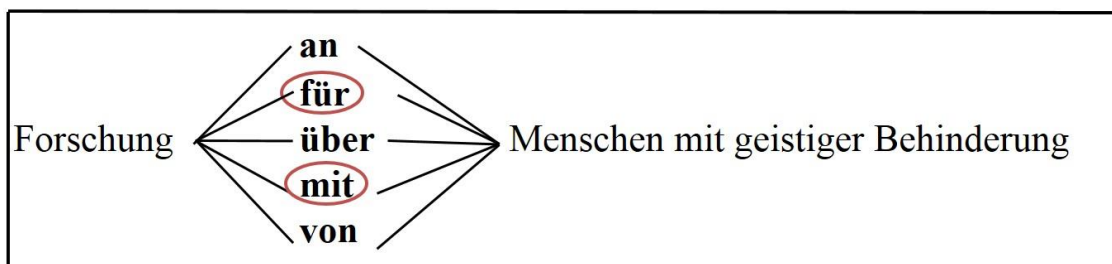


Abbildung 15: Historische Wandlung der Forschungsperspektiven (vgl. Terfloth und Janz 2009)

## **2.4 Assistenzsysteme**

Einleitend wird in diesem Kapitel auf die Begrifflichkeit und aktuellen Anwendungen von Assistenzsystemen eingegangen. Danach werden verschiedene Assistenzarten innerhalb manueller Kommissioniersysteme vorgestellt und für die vorliegende Arbeit eine Eingrenzung vorgenommen.

### **2.4.1 Begriffe und Anwendungen**

Der Begriff „Assistenzsystem“ ist bislang vor allem aus dem Automobilbereich als Unterstützung des Fahrers bei bestimmten Fahrsituationen bekannt. Dem Ursprung nach steht der Begriff „Assistenz“ synonym für „Beistand“ oder „Mithilfe“ (DUDEN 2009). Der Wortbaustein „System“ hingegen bezeichnet eine „Einheit aus technischen Anlagen, Bauelementen, die eine gemeinsame Funktion haben“ (DUDEN 2009). Aufgrund dessen versteht man unter einem „Assistenzsystem“ eine technische Einrichtung, welche meist von einem Rechner gesteuert wird und den Menschen bei einer Tätigkeit unterstützen soll (vgl. Gerke 2014).

Derzeit erlangt der Begriff Assistenzsystem durch seine Anwendung in anderen Gebieten, wie z.B. im Haushalt und der Pflege, der Medizintechnik, aber auch der Industrie, allgemeine Bekanntheit. Im Haushalt und der Pflege sind diese Systeme häufig unter dem Synonym Ambient Assisted Living vertreten. Dort sollen Assistenzsysteme vor allem ältere Menschen in ihrem Alltag unterstützen (z.B. bei der Messung und Kontrolle von Vitalfunktionen), vor Gefahren warnen und ggf. Angehörige oder einen Pflegedienst benachrichtigen. In industriellen Produktionsprozessen hingegen stellen Assistenzsysteme eine Sonderform von Werker- bzw. Mitarbeiterinformationssystemen dar. Diese Systeme verbinden das Informations- und Wissensmanagement an mensch-orientierten Arbeitsplätzen. Ziel ist es, Mitarbeitern für ihre aktuellen Tätigkeiten Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Form bereit zu stellen und sie dadurch bei ihrer Tätigkeit zu unterstützen (vgl. Lang 2007).

### **2.4.2 Eingrenzung verschiedener Assistenzarten in manuellen Kommissioniersystemen**

Mit dem Einsatz von Assistenzsystemen im Kommissionierbereich wird laut Richter (vgl. Richter 2015) versucht die Optimierungsziele

- einer hohen Kapazität,
- einer 100 %-igen Qualität,
- einer maximalen Flexibilität sowie
- einer optimalen Ergonomie

sicherzustellen. Die hierbei eingesetzten Assistenzsysteme lassen sich nach den Arten der

- physischen,
- informationstechnischen und
- kognitiven Unterstützung

unterscheiden.

Die physische Assistenz in der Kommissionierung umfasst dabei vor allem Technologien zur Entlastung des Körpers bei materiaflusstechnischen Handlungen zur Zu- und Abführung der Ladungsträger und Kommissioniereinheiten sowie zur sicheren und schnellen Durchführung von körperlichen Handlungen, also z.B. beim Heben von schweren oder sperrigen Lasten mittels Manipulatoren oder Exoskelette. Diese Form der Assistenz spielt in der vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle. Trotzdem werden bei der Konzeption und Entwicklung Aspekte und Lösungsansätze daraus berücksichtigt und ggf. integriert.

Die informationstechnischen Assistenzfunktionen hingegen haben die Aufgabe, den Informationsaustausch zwischen einem übergeordneten Auftragsmanagement- bzw. Steuerungssystem (z.B. ein Warehouse-Management- oder ein Enterprise-Ressource-Planning-System) und dem Kommissionierer durch Bereitstellung von Informationen (z.B. durch optische Anzeigen im Greifbereich, siehe auch Abbildung 14) sicherzustellen und ggf. bei Fehlern zu intervenieren bzw. eine Rückmeldung zu geben (siehe Abbildung 16). Darüber hinaus können bei der informationstechnischen Assistenz durch die Kommissioniermitarbeiter verschiedene Kontrollinformationen an das Steuerungssystem (z.B. durch Quittierungsvorgänge) rückgemeldet werden.

Die kognitive Assistenz beinhaltet zusätzlich die informationelle Analyse der Situation im Kommissionierbereich sowie die darauf basierende Generierung einer situationsangepassten (kontextsensitiven) Informationsbereitstellung. Diese dritte Art der Assistenz basiert auf IT-gestützten „intelligenten“ Lösungen zu Wahrnehmungs-, Lern-, Wissens- und Handlungsmodellen, welche sich mehrheitlich noch in der Erforschung und Entwicklung befinden, zukünftig aber immer mehr an Bedeutung gewinnen dürften (vgl. Richter 2015).

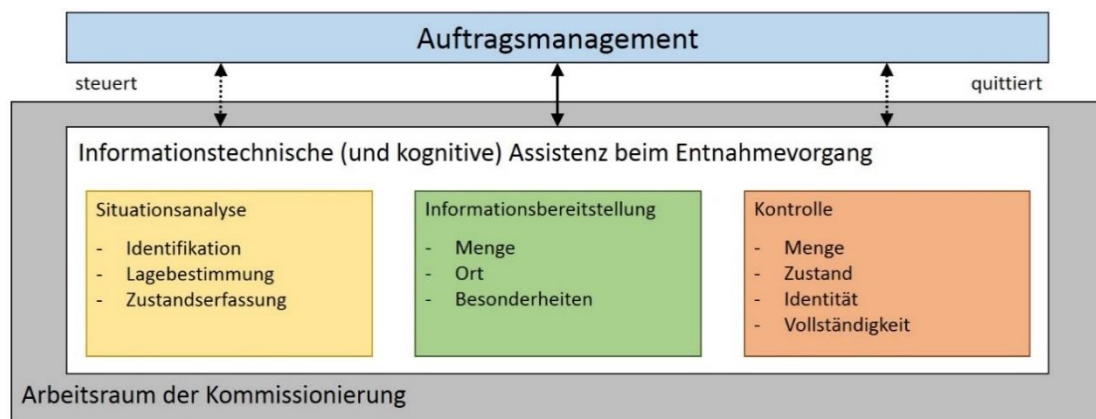


Abbildung 16: Informationstechnische (und kognitive) Assistenz beim Entnahmevorgang (vgl. Richter 2015)

Den Mittelpunkt dieser drei Assistenzsystemtypen bildet die Interaktion und die Führung durch den Menschen. Durch den Einsatz von Assistenzsystemen werden die Vorteile von Mensch und Technik vereint, so dass Arbeitsschritte schneller und präziser ablaufen, Ressourcen geschont und Fehler vermieden bzw. verhindert werden. Unter derlei Gesichtspunkten können vor allem informationstechnische und kognitive Assistenzsysteme eine Möglichkeit darstellen, um gerade auch Menschen mit kognitiver Beeinträchtigung (beispielsweise durch eine geistige Behinderung) zielführend zu unterstützen. Aus diesen Gründen werden nachfolgend verschiedene auf dem Markt verfügbare (Stand der Technik) und noch in Entwicklung befindliche (Stand der Forschung) informationstechnische und kognitive Assistenzsysteme innerhalb der konventionellen Kommissionierung vorgestellt und näher erläutert (siehe Kap. 3).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff „Assistenzsystem“ synonym für informationstechnische und kognitive Assistenzsysteme eingesetzt.

## 2.5 Nutzerzentrierte Entwicklung

Die Entwicklung eines Arbeitssystems orientiert sich an den Grundsätzen der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (siehe Kap. 1.3). Zusätzlich dazu dienen im vorliegenden Fall die Planungshilfen der VDI 3590 Blatt 1-3 als weitere Entscheidungshinweise bei der Auswahl der Grundfunktionen eines Kommissioniersystems (vgl. Hompel et al. 2011). Da im vorliegenden Fall

jedoch kein „klassisches“ Arbeits- oder Kommissioniersystem, sondern zusätzlich ein Assistenzsystem – welches zur Informationsbereitstellung und als Anleitungssystem dient – entwickelt werden soll, sind über die üblichen Planungshinweise für Kommissioniersysteme hinaus weitere Richtlinien zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion (vgl. DIN EN ISO 9241-210) erforderlich.

Für die Entwicklung eines gebrauchstauglichen interaktiven Systems hat sich in den vergangenen Jahren ein evolutionärer Prozess mit Nutzereinbindung etabliert. Hierbei sollen die (potenziellen) Nutzer nicht wie bisher erst im Anschluss an die Entwicklung ein System evaluieren, sondern von Beginn an und parallel an beliebiger Stelle in einem iterativen Entwicklungsprozess zum Testen und Bewerten der erarbeiteten Konzepte einbezogen werden. Im Mittelpunkt dieses Prozesses steht der zukünftige Nutzer mit seinen Bedürfnissen und Anforderungen. Diese Form der partizipativen und nutzergerechten Gestaltung bietet sowohl für den Entwickler und Hersteller als auch für den Nutzer zahlreiche Vorteile, wie z.B. die Erlangung von Informationen mit einer hohen qualitativen Güte für Anpassungen und die entwicklungsabschließende Freigabe, die Sicherstellung einer höheren Qualität und Akzeptanz des Produkts von Nutzerseite etc. (vgl. Zühlke 2012).

Aus diesem bestehenden Prozessablauf der nutzerzentrierten Entwicklung lassen sich für die vorliegende Zielsetzung vier Hauptphasen ableiten:

1. Analyse der zukünftigen Nutzer, ihrer Aufgaben und des Arbeitsumfelds.
2. Spezifikation der Nutzungsanforderungen.
3. Systemgestaltung (Hard- und Software) und anschließende Auswahl eines Konzepts.
4. Realisierung eines funktionstüchtigen Prototyps.

Die vier Phasen laufen nicht rein sequenziell ab, sondern weisen teilweise starke Wechselwirkungen auf. Zudem werden diese jeweils parallel durch Evaluierungen (siehe Kap. 4.2.2, Kap. 6.5.3 und Kap. 8) ergänzt, wie in Abbildung 17 grafisch veranschaulicht.

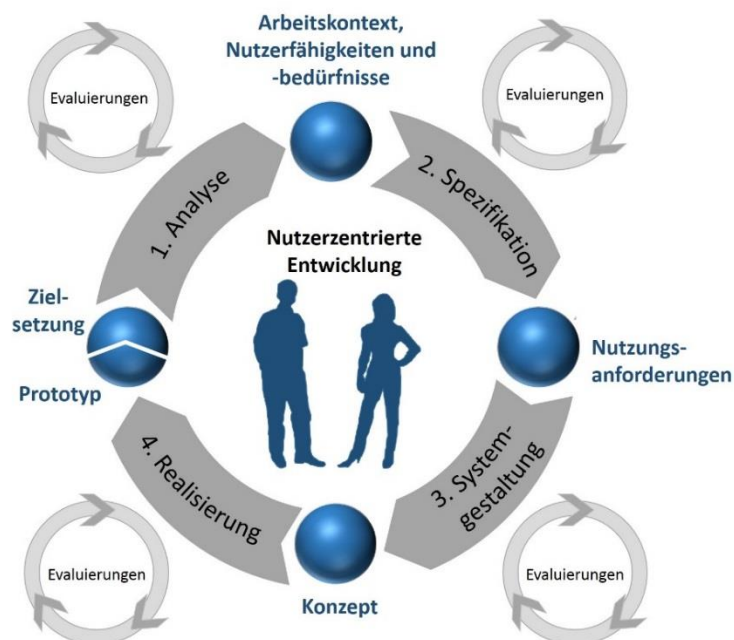


Abbildung 17: Nutzerzentrierte Entwicklung eines Mensch-Maschine-Systems (vgl. Hennecke 2016)

Ein solcher nutzerzentrierter Prozess zur Entwicklung von interaktiven Systemen zielt darauf ab, „Systeme gebrauchstauglich und zweckdienlich zu machen, indem er sich auf die Benutzer, deren Erfordernisse und Anforderungen konzentriert sowie Kenntnisse und Techniken der Arbeitswissenschaft/Ergonomie auf dem Gebiet der Gebrauchstauglichkeit anwendet“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 8).

### 3 Stand der Erkenntnisse zur Informationsbereitstellung und Kontrolle im Bereich der manuellen Person-zur-Ware-Kommissionierung

Das folgende Kapitel stellt den aktuellen Stand der Erkenntnisse zu den gängigsten Techniken der Informationsbereitstellung innerhalb der PzW-Kommissionierung dar. Hierzu wird in einem ersten Schritt der aktuelle Stand der Technik dargestellt. In einem zweiten Schritt werden neuartige Ansätze der informationstechnischen und kognitiven Assistenz im Bereich der manuellen Kommissionierung vorgestellt. Des Weiteren werden die verfügbaren Verfahren einander gegenübergestellt und der Stand der Technik und Forschung anhand von aktuellen und abgeschlossenen Forschungstätigkeiten im Bereich der Unterstützungstechnologien für Menschen mit geistiger Behinderung zur Teilhabe an Arbeit erläutert. An Hand eines Zwischenfazit wird schließlich ein erstes Resümee gezogen.

#### 3.1 Stand der Technik zur Informationsbereitstellung und Kontrolle

Das Informationssystem eines Kommissioniersystems stellt die Schnittstelle zwischen dem übergeordneten Auftragsmanagement und den vom Kommissionierer auszuführenden Handlingprozessen dar (siehe Kap. 2.1.2). Die wesentlichen Aufgaben des Informationssystems (nach der Erfassung der Kundenaufträge und einer entsprechenden Aufbereitung der Auftragsdaten zu einem Kommissionierauftrag) sind die Weiterleitung von Informationen zu Typ, Lagerort, Entnahmemenge und Ablageort der Artikel an den Kommissionierer (siehe auch Kap. 2.1.4 und Anhang S. 165). Zusätzlich kann aber auch die Bereitstellung von Informationen für die Durchführung von Quittier- oder Kontrollschritten erforderlich sein. Durch den Einsatz von IT-Systemen kann eine datenseitige Vernetzung zwischen der Informationsbereitstellung und der Kontrolle ermöglicht werden, was einen weiteren Vorteil bieten kann (vgl. Richter 2015).

Die Übermittlung der Auftragsinformationen an den Kommissionierer kann auf unterschiedliche Arten und unter Einsatz verschiedener Technologien erfolgen. Die derzeit gebräuchlichsten Arten der Kommissioniererführung lassen sich in die beleg- bzw. papiergebundenen und die beleglosen Verfahren unterteilen. Die papiergebundene Informationsübermittlung erfolgt in der Regel auf Basis von Kommissionierlisten, Lieferscheinen oder Etiketten. Im Bereich der beleglosen Informationsübermittlung sind in der PzW-Kommissionierung vor allem die Verfahren Pick-by-Light und -Voice sowie der Einsatz von mobilen Terminals verbreitet (vgl. Hompel et al. 2011). Nachfolgend werden diese vier gängigsten Verfahren zur Kommissioniererführung und -kontrolle näher vorgestellt.

##### 3.1.1 Kommissionierliste

Die beleggebundene Informationsbereitstellung mit einer Kommissionierliste ist die am häufigsten eingesetzte Variante der Kommissioniererführung. Dabei werden dem Kommissionierer die erforderlichen Informationen des Kommissionierauftrags wie z.B. Lagerort, Artikelnummer, Entnahmemenge etc. tabellarisch auf einem Papierbogen bereitgestellt (siehe Abbildung 18). Eine Rückmeldung an das Warehouse-Management-System (WMS) kann immer erst nach Auftragsbeendigung bei Abgabe der abgearbeiteten Auftragsliste erfolgen.

Kommissionierliste							
Auftrags-Nr.: 0024560019							
Kunden-Nr.: 6-23							
Datum: 28.07.2015 / 10:30							
							
Verantwortlicher: Fritz Müller (DW-123)							
Pos	Lagerort	Ablageort	Artikelnummer	Artikelbezeichnung	Menge	Einheit	✓
1	01-03-03	W-01-02-02	3107155	Druckplatte Klippen Gr.2	1	Stk	
2	01-03-04	W-01-03-02	3107649	Kunststoffgriff groß	9	Stk	
3	01-04-02	W-01-01-01	3006110	Profilschiene 340mm	1	Stk	
4	02-03-02	W-01-03-01	3001267	Oberzell TG25	1	Stk	
5	02-03-03	W-01-02-02	3000135	Holzgriff klein TG20	1	Stk	
6	02-03-04	W-01-02-01	3007258	Unterteil TG20	15	Stk	

Abbildung 18: Beispiel einer Kommissionierliste



Aus diesem Grund ist dieses Verfahren für Anwendungsfälle, die eine Echtzeitrückmeldung an das System oder eine permanente Inventur erfordern, ungeeignet.

Zur besseren Orientierung und Kontrolle des Kommissionierers wird häufig eine Spalte der Kommissionierliste zum Quittieren durch händisches „Abhaken“ der einzelnen Auftragspositionen verwendet. Die Hauptvorteile der Kommissionierliste liegen in der einfachen Ausfertigung und Umsetzung sowie den damit verbundenen geringen Investitions- und Betriebskosten. Zur Vermeidung von Kommissionierfehlern muss die Kommissionierliste gut lesbar und eindeutig gestaltet werden. Nachteilig wirkt sich nicht nur der hohe Totzeitanteil durch das Identifizieren von verschiedenen Entnahmepositionen und die Handhabung der Liste aus, sondern auch die geringe Flexibilität z.B. bei nachträglichen Änderungen (vgl. Spee 2009; Hompel et al. 2011).

### 3.1.2 Pick-by-Light

Die Pick-by-Light-Kommissionierung mit optischen Fachanzeigen gehört zu den ortsfesten und beleglosen Systemen und wird seit über 30 Jahren in Deutschland eingesetzt (vgl. Lolling 2003). Bei dieser Art der Kommissionierung wird dem Kommissionierer über das Aufleuchten einer Lampe, welche ober- oder unterhalb des Bereitstellplatzes angebracht ist, der Entnahmepunkt angezeigt. Neben einer Signallampe bestehen die optischen Fachanzeigen in der Regel aus einem Display zur Anzeige der Entnahmemenge sowie aus einem Taster zur Mengenkorrektur und Quittierung der Entnahme (teilweise wird diese Kontrollfunktion bereits automatisch über optische Systeme wie z.B. Lichtgitter umgesetzt) (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Beispiel einer Pick-by- und Put-to-Light Fachanzeige

Die einzelnen Fachanzeigen sind entweder verkabelt oder über ein drahtloses Netzwerk miteinander verbunden. Neben der Entnahmeanleitung wird diese Art der Kommissionierung häufig als Put-to-Light-System zur Anleitung des Ablage- bzw. Zielortes eingesetzt.

Eine Kombination aus Pick-by- und Put-to-Light wird vor allem bei der auftragsparallelen Kommissionierung mit Kommissionierwagen und mehrfach unterteilten Fächern eingesetzt.

Vorteile dieser Lösung sind die hohe Transparenz bei Bestandsänderungen, die Echtzeit- bzw. Online-Erfassung des Auftragsstatus sowie die Möglichkeit einer parallelen Auftragsbearbeitung. Durch die visuelle Kennzeichnung der Lagerplätze und die Anzeige der Entnahmemengen an den Bereitstellplätzen können Totzeiten reduziert und höhere Kommissionierleistungen erreicht werden. Von Nachteil hingegen sind die hohen Kosten für die Anschaffung und Erweiterung (für jeden Bereitstellungsplatz wird eine Fachanzeige benötigt), die Voraussetzung eines implementierten WMS sowie der hohe Organisationsaufwand (vgl. Hompel et al. 2011). Zudem bieten die Signallampen keine Flexibilität für die Darstellungsform der Informationen.

### 3.1.3 Mobile Terminals

Die Kommissioniererführung mit mobilen Datenterminals (MDT) gehört zu den beleglosen Verfahren und ist auch unter dem Namen Pick-by-Display bekannt. Das Datenterminal stellt dabei ein Ein- und Ausgabegerät dar, über das der Kommissionierer die für die Kommissionierung erforderlichen Informationen direkt vom WMS erhält. Ein solches MDT besteht aus drei Hauptbestandteilen: Anzeigemedium (wie z.B. ein Display, Tablet oder Bildschirm), Eingabemedium (wie z.B. eine Tastatur,

Bedienungstasten oder ein Scanner) und Komponente zur Datenübertragung (wie z.B. per Kabel oder über ein lokales Funknetzwerk) (siehe Abbildung 20). Diese mobilen Datenterminals können entweder direkt am Körper getragen (z.B. über eine fixe Befestigung am Arm, Finger oder Gürtel), als handgetragene Version (welche bei Entnahmetätigkeiten in einer Gürteltasche oder am Wagen abgelegt wird) oder als fest mit dem Fördermittel (siehe Kap. 2.1.5) verbaute Ausführung (meist als Bildschirmlösung mit integrierter Touchfunktion) eingesetzt werden. Darüber hinaus sind diese Geräte häufig mit Zusatzfunktionen zur Quittierung wie Barcodescanner, RFID-Lesegerät (engl. Radio-Frequency Identification), Labeldrucker oder Waagen ausgestattet (vgl. Hompel et al. 2011).



Abbildung 20: Mobiles Datenterminal als handgehaltene Ausführung mit integriertem Scanner auf einer Docking-Station

Bei den handgehaltenen und am Körper getragenen Ausführungen reduziert sich durch den Einsatz von Scannern zwar die Fehlerrate, jedoch erhöht sich mit jedem Scanvorgang auch der Zeitaufwand. Durch das Halten des Geräts bei der Tastatureingabe und durch das Lesen der Displayanzeigen werden zudem weitere Leistungseinschränkungen hervorgerufen. Die kleine Displaygröße, die meist schwarze Schrift auf grauem Hintergrund und der hohe Reflexionsgrad des Displays verringern die Lesbarkeit der dargestellten Informationen, was die Wahrscheinlichkeit von Ablesefehlern erhöht (vgl. Lolling 2003).

### 3.1.4 Pick-by-Voice

Die Idee der sprachgesteuerten Kommissioniererführung (Pick-by-Voice) stammt ursprünglich aus den USA, findet jedoch seit über zehn Jahren auch in Deutschland immer größere Verbreitung (vgl. A.S. 2004). Bei dieser Form der beleglosen Informationsbereitstellung erhält der Kommissionierer seine Arbeitsanweisungen vom WMS auf akustischem Wege über eine computergesteuerte Sprachausgabe via Kopfhörer (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Sprachgesteuerte Kommissioniererführung per Pick-by-Voice

Die Quittierung der erfolgreichen Kommissionierung einzelner Auftragspositionen erfolgt im Gegenzug in verbaler Form über ein Mikrofon, welches ebenfalls am Headset befestigt ist. Bei dieser Spracheingabe nennt der Kommissionierer eine Kontrollziffer, welche am Bereitstellungsplatz angebracht ist und zur Vermeidung von Typfehlern dient.

Die weiteren Bestandteile eines Pick-by-Voice-Systems sind ein mobiles Sprachterminal, welches in der Regel am Gurt getragen wird, eine mit dem WMS kompatible Steuerungssoftware sowie ein Datenfunksystem (vgl. Günthner et al. 2009).

Bei Betrachtung der derzeit auf dem Markt verfügbaren Technologien der Kommissioniererführung bietet – unter ergonomischen Gesichtspunkten – Pick-by-Voice den derzeit höchsten Grad an informatorischer Unterstützung. Ein großer Vorteil dieses Systems ist, dass der Kommissionierer die Hände und Augen frei hat, um sich effizient den Haupttätigkeiten des Greifens, Entnehmens etc. zu widmen. Dadurch können Bewegungs- und informatorische Abläufe gewissermaßen auch parallel

stattfinden (z.B. Quittieren der Entnahme durch die Spracheingabe und gleichzeitiges Ablegen des Artikels auf dem Kommissionierwagen). Bei ganztägiger Nutzung und gleichzeitig monotoner Ausführung der Sprachbefehle (z.B. durch eine künstliche Stimme) kann es zu Abneigung und Demotivation beim Kommissionierer kommen. Auch bei der Erkennung der Spracheingaben kann es z.B. durch Störgeräusche der Umgebung oder undeutliche Aussprache Probleme geben, was zu zeitraubenden und teilweise stresssteigernden Wiederholungen der Benutzerbefehle führt. Zudem werden Mitarbeiter durch dieses System abgeschottet, da die Kommunikation untereinander behindert wird (vgl. Reif 2009).

### 3.2 Neuartige Ansätze der informationstechnischen und kognitiven Assistenz

Die vier bereits genannten Verfahren zur Kommissioniererführung und -kontrolle werden in meist sehr ähnlicher Ausführung von zahlreichen Unternehmen zum Verkauf und zur Implementierung in neue oder bestehende Kommissionierungsumgebungen und -systeme angeboten. Neben diesen vier gängigen Techniken der Informationsbereitstellung konnten in einer ausführlichen Marktrecherche weitere Systeme z.B. basierend auf tragbaren Computersystemen, den sogenannten Wearables (z.B. Smartwatches oder -glasses), ermittelt werden. Diese neuartigen Entwicklungen innerhalb der PzW-Kommissioniererführung bieten neben der informationstechnischen teilweise auch eine kognitive Assistenz. Nachfolgend werden die vier wichtigsten neuartigen Verfahren, die meist nur von einzelnen Unternehmen angeboten werden, dargestellt.

#### 3.2.1 Pick-by-Point

Das Pick-by-Point-System der LUCA GmbH wurde zur Unterstützung von Kommissionierern bei hoher Produktvielfalt und schnell wechselnden Sortimenten entwickelt. Diese Form der Kommissioniererführung soll eine Zwischenform der beiden Systeme Pick-by-Light und -Voice darstellen und sich vor allem durch eine hohe Flexibilität und geringe Montagekosten auszeichnen. Dabei beleuchtet und markiert eine bewegliche Lichtquelle das Entnahmefach (siehe Abbildung 23). Zusätzlich werden die Entnahmemenge und die Artikelmerkmale über drahtlose Kopfhörer oder zentrale Anzeigemedien ausgegeben. Eine Zugriffskontrolle bzw. Quittierung der Entnahme kann bei diesem System auf drei verschiedene Arten erfolgen: mit Hilfe des Pick-Radars (ein zentral über dem Entnahmeort angebrachtes Kameraüberwachungssystem, das mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware eine automatische Zugriffskontrolle ermöglicht, siehe Abbildung 22), mit Hilfe eines Funktasters zur manuellen Quittierung oder mit einem Pick-by-Voice System. Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind die mit dem Pick-Radar unterschiedenen Zonen in Abbildung 22 farbig hinterlegt. Die grün hinterlegte Fläche stellt die Zone dar, in welche der Kommissionierer greifen soll. Bei einem Zugriff in die „verbotene“ Zone der rot markierten Fächer



Abbildung 23: Pick-by-Point System (LUCA GmbH 2016)

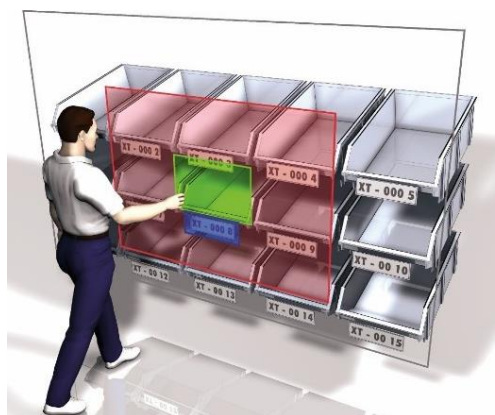


Abbildung 22: Pick-Radar als Zugriffskontrolle (LUCA GmbH 2016)



wird z.B. eine akustische Fehlermeldung ausgelöst. Die blau markierte Fläche dient zur Quittierung nach erfolgreich erfolgter Entnahme (vgl. LUCA GmbH 2016). Die Vor- und Nachteile dieses Systemtyps sind mit denen der Pick-by-Light-Lösung vergleichbar.

### 3.2.2 Pick-by-Beamer

Das Kommissionierprinzip Pick-by-Beamer der Firma SAFELOG besteht darin, dass die für den Kommissionierer erforderlichen Anweisungen direkt am Regal und Kommissionierwagen gegeben werden. Hierzu projizieren starr am Kommissionierwagen befestigte Signalleuchten (für jede Regalebene und -seite ist jeweils eine Signalleuchte am Kommissionierwagen befestigt) einen Lichtpunkt auf das jeweilige Fach (siehe Abbildung 24). Weitere Informationen wie Entnahmemenge, Artikelnummer etc. werden über einen am Kommissionierwagen befestigten Bildschirm angezeigt (siehe Abbildung 25). Die Anleitung der Ablage auf dem Kommissionierwagen erfolgt mittels Put-to-Light-Fachanzeigen (siehe Abbildung 19). Zusätzlich kann zur automatischen Quittierung und Kontrolle eine von SAFELOG patentierte Zugriffs- und Ablageüberwachung implementiert werden. Dabei wird anhand eines messenden Lichtvorhangs (umgesetzt über einen oberhalb des Regals oder Kommissionierwagens befestigten rotierenden Laserscanner) jeweils die Zugriffsposition vor dem Regal bzw. die Ablageposition auf dem Wagen bestimmt und diese mit den hinterlegten Daten des Kommissionierauftrags bzw. des WMS abgeglichen. Dadurch kann eine direkte Fehlerrückmeldung erfolgen und etwaige Fehler unmittelbar behoben werden (vgl. SAFELOG GmbH 2016). Die Vor- und Nachteile dieses Kommissionierprinzips entsprechen aufgrund der Ähnlichkeit ebenfalls denen von Pick-by-Light.

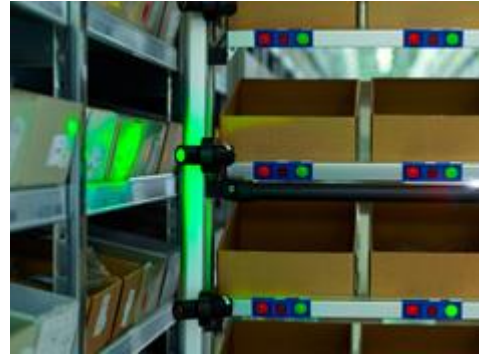


Abbildung 24: Pick-by-Beamer im Einsatz (SAFELOG GmbH 2016)



Abbildung 25: Darstellung von Zusatzinformationen per Bildschirm (SAFELOG GmbH 2016)

### 3.2.3 Pick-by-Watch

Eine weitere neue Methode der Kommissioniertechnik stellt die Pick-by-Watch-Technologie von SSI Schäfer und der HandyGames GmbH dar. Hierbei werden dem Kommissionierer die erforderlichen Informationen wie z.B. der Lagerplatz, die Entnahmemenge oder der Ablageplatz über eine am Handgelenk getragene spezielle Armbanduhr, welche z.B. über Computerfunktionalitäten und Sensoren verfügt (eine sogenannte Smartwatch), angezeigt (siehe Abbildung 26). Eine Weiterschaltung oder Quittierung einzelner Prozessschritte erfolgt manuell über das Display der Smartwatch. Zusätzlich wird die Entnahme der korrekten Artikel über einen Symbolabgleich kontrolliert. Dies bedeutet, dass neben der Kennzeichnung eines Lagerortes zusätzlich ein Piktogramm dargestellt wird.



Abbildung 26: Pick-by-Watch mit integrierter Entnahmekontrolle (Reichel 2016)

Auf dem Display der Smartwatch hingegen werden vier Icons angezeigt – das richtige und drei falsche. Der Kommissionierer muss nun per Touchfunktion das richtige anklicken, um mit der Kommissionierung fortfahren zu können. Zusätzlich bietet Pick-by-Watch über die Touchfunktion auch die Möglichkeit, bei Abweichungen der Lagerbestände Korrekturen direkt im WMS vorzunehmen (vgl. Reichel 2016). Die Hauptvorteile dieses neuen Systemtyps sind eine einfache Benutzerführung, eine verhältnismäßig hohe Kommissioniersicherheit durch eine zusätzliche Kontrollfunktion sowie eine kostengünstige Umsetzung und einfache Einbindung in verschiedenste WMS-Systeme. Auch dass beide Hände für den Kommissionierprozess frei sind und keine zusätzliche Handhabung eines technischen Geräts wie z.B. bei einem MDT erforderlich ist, stellt einen positiven Aspekt dar. Nachteilig wirkt sich (wie bei mobilen Datenterminals) die Größe der Displayanzeigen und die dadurch bedingte schlechte Lesbarkeit der dargestellten Informationen bzw. die erhöhte Wahrscheinlichkeit für Ablesefehler aus.

### 3.2.4 Pick-by-Vision

Die manuelle PzW-Kommissionierung mit Pick-by-Vision, basierend auf dem Einsatz eines Head-Mounted Displays (auch Datenbrille oder Smart Glass genannt), zählt zu den neuesten und innovativsten Verfahren der Informationsbereitstellung. Dabei werden dem Kommissionierer über die Datenbrille alle auftragsrelevanten Informationen direkt ins Sichtfeld projiziert oder auf einem kleinen, direkt vor dem Auge befindlichen Monitor angezeigt, was zu einer visuellen Erweiterung der sichtbaren Realität (Augmented Reality<sup>10</sup>) führt. Je nach Ausführung der Datenbrille



Abbildung 27: PzW-Kommissionierung mit Pick-by-Vision (Ubimax GmbH 2016b)

wird zwischen monokularer (auf einem Auge) oder binokularer (auf beiden Augen) Augmented Reality Visualisierung unterschieden. Diese innovative Technologie eröffnet neue Möglichkeiten, die für den Kommissionierer erforderlichen Informationen exakt zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Art und Weise sowie direkt am Ort des Geschehens und in Überlagerung mit der sichtbaren Realität darzustellen. Des Weiteren sollen sich zukünftig mit Hilfe von Zusatzmodulen, wie z.B. einem in die Datenbrille integrierten Barcode-Scanner oder einer automatischen Spracherkennung von mündlich aufgesagten Prüfziffern, Quittier- bzw. Kontrollfunktionen direkt in die Datenbrille integrieren lassen. Zudem lassen sich die Art, der Umfang und der Ort der dargestellten Informationen flexibel an die Bedürfnisse der Mitarbeiter sowie die Rahmenbedingungen des Prozesses anpassen.

---

<sup>10</sup> Augmented Reality (zu Deutsch: erweiterte Realität) ist nach dem „Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum“ von Milgram et al. (vgl. Milgram et al. 1994) ein Teilbereich der sogenannten gemischten Realität (Mixed Reality). Im Allgemeinen wird darunter die computergestützte Erweiterung der vom Menschen wahrgenommenen Realität durch rein virtuelle Objekte verstanden. In der Literatur lassen sich zwei grundlegende Definitionen für Augmented Reality (AR) finden: Bei der ersten von Caudell et al. (vgl. Caudell und Mizell 1992) wird AR auf konkrete Technologien wie z.B. Head-Up-Displays begrenzt, welche die menschliche Wahrnehmung durch kontextsensitive (situationsangepasste) Informationen erweitern. Bei der zweiten Definition von Azuma (vgl. Azuma 1997) hingegen wird AR als eine Variation der virtuellen Realität definiert, bei welcher die virtuelle und die tatsächliche Realität miteinander kombiniert werden, die Interaktionen in Echtzeit erfolgen und die realen und virtuellen Objekte dreidimensional zueinander in Bezug stehen (vgl. Muschiol 2013). Anwendungsfälle dieser Technologie lassen sich in verschiedensten Bereichen von der Medizin über die Industrie und die Unterhaltungsbranche bis hin zum Militär finden.

Durch die umfangreichen Anpassungsoptionen und den vollständigen Verzicht auf Elektronik in der Umgebung (einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein eines WLAN-Netzwerks) lässt sich Pick-by-Vision mit wenig Aufwand und geringen Investitionskosten implementieren und bei Bedarf verändern. Zusätzlich bleiben auch bei dieser Form der Kommissioniererführung beide Hände für die eigentliche Kernaufgabe frei (vgl. Ubimax GmbH 2016).

Trotz erster Industrieanwendungen muss diese Form der Informationsvisualisierung nach wie vor als visionäre und vor allem im Bereich der Kontrolle als noch nicht vollständig „ausgereifte“ Variante betrachtet werden. Ausführliche Untersuchungen von Wille (vgl. Wille) im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und -medizin zeigen, dass mit der Nutzung von Head-Mounted-Displays (HMDs) als Anleitungsmedium deutlich höhere subjektive Beanspruchungen, visuelle Ermüdungswerte sowie teilweise Kopf- und Nackenschmerzen, aber auch geringere Arbeitsleistungen einhergehen als bei der Verwendung von Tablet-PCs. Bei älteren und unerfahrenen Versuchsteilnehmern haben sich diese Effekte noch verstärkt. Zudem wird von den Versuchsteilnehmern bei der Nutzung von HMDs häufig ein mangelnder Tragekomfort beanstandet. Bereits bei früheren Untersuchungen von Schwerdtfeger (vgl. Schwerdtfeger 2009) traten ähnliche Probleme auf. So klagten Versuchsteilnehmer nach der Nutzung von HMDs über starke Kopfschmerzen, einen hohen Druck auf den Augen sowie eine verschlechterte Sehfähigkeit. Diese erhöhte mentale Beanspruchung hat sich durch die derzeitigen technologischen Weiterentwicklungen verringert, kann aber nach wie vor nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da ein HMD nach wie vor eine abwechselnde Fokussierung zwischen den virtuellen Informationen und der Realität erfordert. Auch bei einer Felduntersuchung von Baumann (vgl. Baumann 2013) bevorzugten alle Versuchsteilnehmer, welche sowohl ein Tablet als auch ein HMD zur Kommissioniererführung testeten, das Tablet. Die zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der vergangenen Jahre im Bereich der tragbaren Computersysteme u.a. von Starner (vgl. Starner 2016), Günthner (vgl. Günthner 2016), Schlick (vgl. Schlick 2016) und Lawo (vgl. Lawo 2016) verdeutlichen jedoch das große Innovationspotenzial dieser Technologie. Diese Arbeiten lassen darauf hoffen, dass sich in den kommenden Jahren eine weitere Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit ergibt.

Erste industriefähige Pick-by-Vision-Systemlösungen werden mittlerweile von einzelnen Unternehmen wie z.B. der Ubimax GmbH, der Picavi GmbH oder der topsystem Systemhaus GmbH angeboten und in Pilotprojekten implementiert. Diese basieren auf Datenbrillen verschiedener Hersteller wie z.B. Google, Vuzix, Epson etc.

Trotz dieser ersten Praxis- und Industrieanwendungen sind eine Reihe von Fragestellungen hinsichtlich der Ergonomie und mentalen Beanspruchung im Zusammenhang mit dem Einsatz dieser neuartigen Unterstützungstechnologie noch nicht hinreichend gelöst (vgl. Richter 2015; Böckelmann et al. 2015).

### **3.3 Gegenüberstellung der vorgestellten Person-zur-Ware-Verfahren**

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten gängigen und auf dem Markt verfügbaren Kommissionierverfahren wurden bereits in zahlreichen praxisnahen Untersuchungen anhand verschiedener Gesichtspunkte und Kriterien wie z.B. der Nutzerbeanspruchung, der Kommissionierqualität oder der -zeit miteinander verglichen und bewertet (vgl. Guo et al. 2014; Baumann 2013; Reif 2009; Lolling 2003). Diese Untersuchungen unterscheiden sich jedoch nicht nur in ihrem Studiendesign und ihren Inhalten, sondern teilweise auch in ihren Ergebnissen. Aus diesem Grund soll die nachfolgende Gegenüberstellung (siehe Tabelle 1) einen Gesamtüberblick über den aktuellen Stand der Technik in der PzW-Kommissionierung mit normal leistungsfähigen Mitarbeitern darstellen. Hierbei ist zu beachten, dass die neuartigen Verfahren Pick-by-Point und -Beamer aufgrund ihrer Ähnlichkeit in der

Lagerortidentifizierung unter dem Verfahren Pick-by-Light mitbehandelt werden. Das Verfahren Pick-by-Watch wird aufgrund seiner Ähnlichkeit zu den mobilen Terminals dort mitberücksichtigt.

Das Bewertungskriterium der intuitiven Verständlichkeit bezieht sich auf eine leicht verständliche Gestaltung der dargestellten Informationen nach arbeitspsychologischen Kriterien sowie den kognitiven Aufwand für die Nutzung im Zusammenhang mit der Gebrauchstauglichkeit des jeweiligen Verfahrens. Das Kriterium der „Flexibilität für Individualisierung“ bezieht sich auf die Möglichkeit einer individuellen Gestaltung des jeweiligen Verfahrens inklusive der dargestellten Informationen. Das Bewertungskriterium „Ergonomie“ betrifft ergonomische Aspekte des Handhabungsaufwands wie z.B. die Beeinträchtigung durch technische Komponenten, welche für die Nutzung des jeweiligen Verfahrens erforderlich sind (wie z.B. das Tragen einer Datenbrille oder eines Handhelds) oder aber auch, ob bei der Nutzung beide Hände für den Kommissionierprozess frei bleiben.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der gängigsten Verfahren zur Kommissionierführung und -kontrolle (in Anlehnung an Haberl 2009)

	Kommissionierliste	Pick-by-Light	Mobile Terminals	Pick-by-Voice	Pick-by-Vision
<b>Lagerort-identifizierung</b>	Visuell über Liste	Visuell über Lichtsignal	Visuell über Display	Auditiv über Headset	Visuell über AR
<b>Intuitive Verständlichkeit</b>	Niedrig	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel
<b>Flexibilität für Individualisierung</b>	Niedrig	Niedrig	Mittel	Niedrig	Hoch
<b>Ergonomie</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Mittel	Mittel
<b>Entnahme-bestätigung</b>	Abhaken der Positionen auf der Kommissionierliste	Manuell über Taster am Regal oder automatisch über Lichtvorhang	Abscannen der Etiketten	Spracheingabe der Kontrollziffer	(Visuelles Abscannen)
<b>Fehleranfälligkeit<sup>11</sup></b>	Mittel	Mittel	Hoch	Niedrig	Niedrig
<b>Pickleistung</b>	Mittel	Sehr gut	Gut	Gut	Gut
<b>Kosten steigen mit Anzahl der</b>	Kommissionierer	Lagerplätze	Kommissionierer	Kommissionierer	Kommissionierer

Je nach Einsatzgebiet und Verwendungszweck haben die vorgestellten Kommissionierverfahren spezifische Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile. Aus diesem Grund lässt sich keine allgemeingültige Aussage über ein optimales Kommissionierverfahren machen, da jedes Verfahren trotz stetiger Optimierung und Weiterentwicklung nach wie vor auch Schwächen aufweist. Bei den meisten Verfahren lassen sich große Defizite bzgl. der intuitiven Verständlichkeit, der individuellen Gestaltbarkeit sowie dem Handhabungsaufwand und den arbeitspsychologischen Kriterien finden. Zudem muss für die Auswahl eines geeigneten Kommissionierverfahrens zuallererst eine detaillierte Analyse des Anwendungsfalles (siehe Kap. 4.1) und der Nutzergruppe (siehe Kap. 4.2) durchgeführt werden.

Im vorliegenden Kontext stellt die Nutzergruppe einen elementaren Faktor für die Auswahl eines Kommissionierverfahrens als Unterstützungstechnologie dar, wobei der unterstützende Aspekt einen besonderen Schwerpunkt darstellt. Nachfolgend erfolgt daher eine Darstellung der aktuell verfügbaren bzw. in Entwicklung und Erforschung befindlichen Unterstützungstechnologien, welche für Menschen mit geistiger Behinderung geeignet sein könnten.

<sup>11</sup> vgl. Günthner et al. 2009; Hoppel und Schmidt 2008; Lolling 2003

### **3.4 Stand der Technik und Forschung im Bereich von Unterstützungstechnologien für Menschen mit geistiger Behinderung zur Teilhabe an Arbeit**

Die bisher genannten Verfahren und Technologien im Bereich der Informationsbereitstellung und Kontrolle für manuelle Kommissioniertätigkeiten richten sich primär an normal leistungsfähige Nutzer und lassen sich kaum für Menschen mit geistiger Behinderung einsetzen oder adaptieren.

Alles in allem sind bisher wenige bis keine Unterstützungstechnologien verfügbar, um Menschen mit kognitiven Einschränkungen die Teilhabe an Arbeit im industriellen Umfeld zu ermöglichen. Die verfügbaren technischen Systeme zur Unterstützung von Menschen mit Behinderung konzentrieren sich zum einen mehrheitlich auf körperliche Behinderungen und Rehabilitation sowie zum anderen auf den Freizeit- und Pflegebereich, aber nicht auf das Arbeitsleben der betroffenen Personen. Eine Ausnahme bildet das System Cubu:S der Firma Schnaithmann (vgl. Vogel Business Media GmbH & Co. KG 2015), das in einem interdisziplinären Forschungsprojekt als Assistenzsystem für leistungseingeschränkte Menschen in der manuellen Montage entwickelt wurde.

Auch im Forschungsbereich setzt sich diese Tendenz fort. Es existieren auf nationaler Ebene eine Reihe von Forschungsprojekten im Bereich der Assistenzsysteme zur Unterstützung körperlicher Funktionen (vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2016). Im Bereich der Unterstützung von kognitiven Einschränkungen, insbesondere im Kontext des Arbeitslebens hingegen, gibt es nur vereinzelt Forschungsarbeiten. Die wenigen Aktivitäten im europäischen Raum konzentrieren sich auf einzelne Veröffentlichungen z.B. im Rahmen der Konferenzen „International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP)“ und der „Association for the Advancement of Assistive Technology in Europe (AAATE)“.

Einen Mangel an Assistenztechnologien für Menschen mit kognitiven Beeinträchtigungen zur Unterstützung von Arbeitstätigkeiten konstatiert auch Ramdoss (vgl. Ramdoss 2013). Jääskeläinen und Nevala beschäftigen sich zwar mit Assistenztechnologien für Mitarbeiter mit physischen und kognitiven Beeinträchtigungen, jedoch nur im Kontext von Computerarbeit (vgl. Jääskeläinen und Nevala 2012).

Die große Bedeutung und den Einfluss von Assistenzsystemen für den Zugang zu einer allgemeinen Beschäftigung von Menschen mit Behinderung stellen Johnston et al. dar (vgl. Johnston et al. 2014). Auch Sauer et al. konnten in ihrer Arbeit zwar feststellen, dass Assistenzsysteme einen positiven Effekt auf die Arbeitsleistung und -qualität sowie die Selbständigkeit von Menschen mit kognitiven Einschränkungen haben, kamen aber gleichzeitig auch zu dem Schluss, dass bisher zu wenig in diesem Bereich geforscht wird (vgl. Sauer et al. 2010).

Die wenigen Forschungsarbeiten, die sich mit Unterstützungstechnologien für Menschen mit geistiger Behinderung zur Teilhabe am Arbeitsleben im industriellen Umfeld befassen, betreffen zum allergrößten Teil Arbeitsprozesse der Montage und Fertigung, nicht aber logistische Tätigkeiten wie die manuelle Kommissionierung.



### **3.5 Zwischenfazit**

In den vorhergehenden Unterkapiteln wurde aufgezeigt, dass bereits heute eine Vielzahl an technischen Hilfsmitteln zur Informationsbereitstellung und Kontrolle innerhalb der PzW-Kommissionierung für den Markt zur Verfügung stehen oder wissenschaftlich untersucht werden. Die Kommissionierverfahren des derzeitigen Stands der Technik weisen jedoch deutliche Schwächen in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit bzw. intuitive Verständlichkeit, die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten der darzustellenden Informationen sowie eine Entkopplung der Unterstützungstechnologie und des Nutzers auf. Neuartige Kommissionierverfahren wie Pick-by-Vision können zwar diese Schwächen kompensieren, erfordern dafür aber das Tragen einer Datenbrille, die die Sehfähigkeit beeinträchtigen kann und sich zudem häufig negativ auf die Arbeitsbeanspruchung auswirkt. Ein weiterer Nachteil der bisherigen Ansätze der Kommissioniererführung ist, dass die Quittierung oder Kontrolle eines Kommissionierschrittes in der Regel nicht automatisch erfolgt, sondern einen zusätzlichen Handhabungsschritt erfordert und damit einen weiteren Zeitaufwand darstellt bzw. weiteres Fehlerpotenzial birgt.

Insbesondere unter dem Augenmerk der besonderen und von der Gesellschaft und Industrie marginalisierten Zielgruppe von Menschen mit Behinderung bietet dieser derzeitige Stand der Technik und Forschung also kein hinreichend zufriedenstellendes Kommissionierverfahren, welches diese Personengruppe adäquat bei der manuellen PzW-Kommissionierung unterstützen könnte.

Dieser Erkenntnisstand verdeutlicht, welche Forschungslücke die vorliegende Arbeit zu schließen versucht. Dabei wird, wie in Kapitel 2.3.3 bereits dargestellt, gesetzlichen Normen und aktuellen Forderungen Rechnung getragen, um Teilhabe an Arbeit – besonders für Menschen mit geistiger Behinderung – zu ermöglichen.

Für die Spezifizierung und Entwicklung eines geeigneten Assistenzsystems ist jedoch zunächst eine Analyse des derzeitigen Kommissionierprozesses sowie der zukünftigen Nutzergruppe (Menschen mit Behinderung) nötig, um daraus im Anschluss konkrete Handlungsfelder für eine Anforderungsanalyse ableiten zu können.

## 4 Analyse des Arbeitsprozesses und der Nutzergruppe

In Weiterführung der in Kapitel 1.1 beschriebenen Ausgangssituation werden im vorliegenden Kapitel, als erster Schritt der nutzerzentrierten Entwicklung (siehe Kap. 2.5), die Interaktionspartner der technischen Anwendung, Mensch und Maschine, untersucht. Stellvertretend für den Interaktionspartner Maschine wird im vorliegenden Fall der bestehende Kommissionierprozess in der betrachteten WfbM anhand der vorhandenen Hardware und des bisherigen Ablaufs analysiert. Anschließend werden die zukünftigen Nutzer mit ihren Fähigkeiten, bisherigen Arbeitsinhalten und Bedürfnissen auf Basis von Ergebnissen einer empirischen Erhebung vorgestellt. Aus diesen Erkenntnissen werden schlussendlich Handlungsfelder abgeleitet, welche wiederum die Voraussetzung und Ausgangsbasis für die weitere Vorgehensweise der nutzerzentrierten Entwicklung für eine Spezifikation der Anforderungen bilden (siehe Kap. 5).

### 4.1 Analyse eines Kommissionierprozesses innerhalb der WfbM

Exemplarisch für die Kommissionierung im Umfeld von leistungsgeminderten Menschen wird nachfolgend der bisherige Stand der Kommissionierung anhand des bestehenden Hardwareaufbaus und des gängigen Prozessablaufs in einer WfbM – mit welcher im Zuge dieser Arbeit zusammengearbeitet wird – dargestellt.

#### 4.1.1 Hardwareaufbau

*Der derzeit vorhandene Aufbau in der WfbM besteht aus neun in Reihe angeordneten Durchlaufregalen, welche sich als Materiallager bzw. -puffer direkt im Fertigungsbereich befinden (siehe*

*Abbildung 28, links). Die Regaleinheiten bestehen jeweils aus drei Bereitstellungs- bzw. Entnahmeebenen und einer Rückföhrebene. Als Kommissionier- bzw. Fördermittel werden Etagenwagen in unterschiedlichen Größenausführungen mit zwei bis drei Ablageebenen eingesetzt. Die Artikelbereitstellung in den Durchlaufregalen erfolgt in Sammelbehältern des Typs ELB 4120, mit einem Maximalgewicht von ca. 10 kg pro Behälter. Insgesamt sind über 800 verschiedene Artikel eingelagert. Das Artikelspektrum umfasst Einzelteile und vormontierte Baugruppen für die Endmontage von derzeit etwa 400 verschiedenen Produktvarianten aus dem Bereich der manuellen Schneidtechnik. Dieser vorhandene Warenbestand hat eine zeitliche Reichweite von ungefähr einem Monat.*

#### 4.1.2 Ablauf eines Kommissioniervorgangs

Der vorliegende Kommissionierprozess gehört zum innerbetrieblichen Materialflusssystem der Produktionslogistik und stellt die Versorgung des Produktionsprozesses sicher. Das Ziel der Kommissionierung ist es in diesem Fall, eine losgrößengerechte Materialbereitstellung für die Produktion sicherzustellen und dadurch Unterbrechungen im Fertigungsablauf zu vermeiden (siehe Kap. 2.1.3).

*Der derzeitige Materialfluss beginnt mit der Anlieferung der verschiedenen Einzelartikel in Kartons und in Heson-Stapelbehältern. Aus diesen Transportbehältnissen werden die Einzelteile dann von leistungsgeminderten Mitarbeitern in die einheitlichen Sammelbehälter (ELB 4120) umsortiert und von normal leistungsfähigen Mitarbeitern in die Regallager einsortiert. Die anschließende auftragsbezogene Kommissionierung der einzelnen Artikel erfolgt durch normal leistungsfähige Mitarbeiter mit Hilfe eines als Papierliste ausgedruckten Kommissionierauftrags, nach dem PzW-Grundprinzip (siehe Kap. 2.1.4). Im vorliegenden Kommissionierauftrag sind die jeweils zu kommissionierenden Artikel mit den zugehörigen Informationen (Artikelnummer, Lagerort, Menge etc.) in tabellarischer Form aufgeführt. Die Kommissionierung von Schüttgütern wie z.B. Schrauben, Unterlegscheiben, Bolzen etc. erfolgt nur in ganzen Behältern und nicht als Teilmenge. Größere Artikel oder Baugruppen hingegen können je nach Bedarf auch als Einzelteile entnommen und in einen Leerbehälter kommissioniert werden. Die Kommissionierreihenfolge des Auftrags wird selbstständig vom Kommissionierer festgelegt. Nach der Entnahme findet ggf. eine kurze Kontrolle der Identität bzw. bei der Entnahme von einzelnen Teilen eine Stückzahlkontrolle statt. Eine anschließende Quittierung der jeweils kommissionierten Auftragsposition durch Abhaken auf der Papierliste ist den*

Kommissionierern freigestellt. Sobald ein Kommissionierauftrag komplettiert ist, wird der Kommissionierwagen an die Montagelinie überführt, wo dann die jeweiligen Arbeitsplätze mit den dazugehörigen Artikeln bestückt werden. Pro Woche werden ca. 15-25 Kommissionieraufträge abgewickelt, wovon jeder Auftrag maximal 25 Positionen umfasst. In

Abbildung 28 (rechts) ist der exemplarische Kommissionierablauf für eine Position bzw. einen Auftrag nach derzeitigem Stand dargestellt.



Abbildung 28: Derzeitiger Kommissionieraufbau (links) und Prozessablauf für die Kommissionierung (rechts) in der WfbM

## 4.2 Leistungsprofilanalyse von leistungsgeminderten Mitarbeitern innerhalb der WfbM

Für die Entwicklung eines gebrauchstauglichen technischen Produkts, das später mit Menschen interagieren soll, ist es von großer Bedeutung, dass bereits vor Beginn der Entwicklung die zukünftigen Nutzer mit ihren individuellen Bedürfnissen analysiert und sie konsequent in den gesamten Entwicklungsprozess miteingebunden werden. Das erste und wichtigste Prinzip der nutzerzentrierten Entwicklung „Know the User“ (vgl. Hansen 1971; Shneiderman 1979) (siehe Kap. 2.5) soll verhindern, dass bei der späteren Nutzung der „flexible“ Mensch sich an die „starre“ neuentwickelte Maschine anpassen muss (vgl. Zühlke 2012).

Zudem unterscheiden sich die Individuen der vorliegenden Zielgruppe der leistungsgeminderten Mitarbeiter untereinander deutlich stärker bzw. weisen eine höhere Heterogenität hinsichtlich ihrer persönlichen Eigenschaften wie kognitiver, sensorischer und motorischer Leistungsfähigkeit, Arbeitserfahrung etc. auf, als dies bei normal leistungsfähigen Mitarbeitern der Fall ist (vgl. Schäfers 2008; Sarimski 2009; Schlick et al. 2010). Aus diesen Gründen ist es im Vorfeld der Konzeption und Entwicklung erforderlich, die zukünftige Nutzergruppe mit ihren individuellen Vorkenntnissen, bisherigen Arbeitsinhalten und Bedürfnissen näher zu betrachten, diese mit Hilfe einer empirischen Untersuchung zu analysieren, ggf. auch zu spezifizieren, daraus entsprechende Anforderungen abzuleiten (siehe Kap. 5.2) und sie somit von Beginn an in den gesamten Entwicklungsprozess miteinzubinden.

### 4.2.1 Kategorisierung und Tätigkeitsgebiete der leistungsgeminderten Mitarbeiter

Zum aktuellen Zeitpunkt werden die leistungsgeminderten Mitarbeiter der betrachteten WfbM, abhängig von ihrem individuellen Leistungsgrad (IL) in drei Hauptgruppen kategorisiert:

1. Mitarbeiter mit niedrigem Leistungsgrad:  $IL < 15 \%$
2. Mitarbeiter mit mittlerem Leistungsgrad:  $15 \% \leq IL < 40 \%$

### 3. Mitarbeiter mit hohem Leistungsgrad: IL $\geq$ 40 %

Diese prozentuale Leistungseinschätzung stellt die gemessene Leistung eines Mitarbeiters (bei entsprechend eingehaltener Qualität) dar, welche er im Vergleich zu einem normal leistungsfähigen Mitarbeiter mit einer vollen Leistungsfähigkeit von 100 % erbringt.

Die Eingruppierung erfolgt unter Zuhilfenahme verschiedener methodischer Werkzeuge wie z.B. des Testverfahrens „hamet e“<sup>12</sup> und eines unternehmensinternen Kriterienkatalogs. Zusätzlich fließen für die Bewertung vor allem die Erfahrungen der Fachbetreuer vor Ort mit ein, welche die zu bewertende Person von ihrer Tätigkeit und ihrem Arbeitsalltag her kennen.

Neben der Einteilung in Leistungsgruppen findet in der Behindertenpädagogik und auch in der WfbM eine Unterteilung der Mitarbeiter nach der Form der vorliegenden Behinderungsarten in körperliche, geistige und psychische Beeinträchtigungen statt (vgl. Bleidick 1999). Aktuelle Zahlen zeigen, dass bei knapp vier Fünftel der Werkstattbeschäftigten die Diagnose auf geistige Behinderung lautet, während der Anteil der Mitarbeiter mit psychischer und/oder körperlicher Behinderung nur etwa 20 % der Gesamtbeschäftigten ausmacht (vgl. Gehrmann 2012).

Aufgrund der begrenzten Einsatz- und Leistungsfähigkeit der Menschen mit geistiger Behinderung wird diese größte Gruppe in WfbMs und somit auch im betrachteten Fall für eher einfache, sich wiederholende und dadurch meist monotone Arbeitsaufgaben eingesetzt. Hierzu gehören vor allem Tätigkeiten mit wenigen Arbeitsinhalten wie z.B. das Bestücken von Steckbrettern mit Bolzen und Schrauben, das Montieren von Baugruppen bestehend aus bis zu sechs Einzelteilen oder das Verpacken bzw. Konfektionieren von verkaufsfähigen Produkten.

Das Anlernen der Mitarbeiter in die jeweilige Arbeitsaufgabe erfolgt mittels mehrmaligem Vormachen, Erklären und anschließendem Nachmachen und Üben der Arbeitstätigkeit unter Betreuung durch das technische bzw. pädagogische Fachpersonal der WfbM. Im Anschluss an die Anlernphase, welche abhängig von den individuellen Bedürfnissen der Mitarbeiter unterschiedlich lange dauern kann, führen die Mitarbeiter die jeweilige Arbeitstätigkeit selbstständig durch. Als weiterführende Unterstützung sind an den rund 90 Arbeitsplätzen der betrachteten WfbM papierbasierte produktbegleitende Arbeitsbeschreibungen mit textuellen und fotografischen Elementen angebracht. Falls darüber hinaus zusätzlicher Unterstützungsbedarf erforderlich ist, steht jederzeit ein Betreuer als Ansprechpartner zur Verfügung.

Ergänzend zu diesen Beobachtungen zeigen Ergebnisse einer Befragung des Fachpersonals der betrachteten WfbM zum potenziellen Einsatz von Assistenzsystemen für manuelle Industrieprozesse, dass primär Menschen mit geistiger Behinderung von einem solchen technischen Unterstützungssystem profitieren könnten (vgl. Bächler et al. 2015b).

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse von zwei Studien mit einem Montageassistenzsystem, dass ein solches Unterstützungssystem vor allem für Mitarbeiter mit kognitiven Einschränkungen aus der niedrigsten Leistungsgruppe (IL < 15 %) eine hilfreiche Unterstützung darstellt und sich positiv auf die Arbeitsbeanspruchung, die produzierte Qualität und die Ausführungszeit der ausgeübten Tätigkeit auswirken kann (vgl. Baechler et al. 2016c; Funk et al. 2015).

Die Erfahrungen aus dem Montagebereich können jedoch nicht direkt auf den Intralogistikbereich der Kommissionierung übertragen werden. Aus diesem Grund ist es zu Beginn des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses des Kommissionierassistenzsystems erforderlich, eine Erhebung zu den

---

<sup>12</sup> Dieses handlungsorientierte Testverfahren wird zur Erfassung und Förderung elementarer handwerklich motorischer Kompetenzen von Menschen mit erhöhtem Förderbedarf eingesetzt (vgl. Berufsbildungswerk Waiblingen gGmbH).

Vorkenntnissen und Bedürfnissen der zukünftigen Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen durchzuführen. Diese empirische Untersuchung wird nachfolgend mit ihren Ergebnissen und den daraus gefolgerten Spezifizierungen dargestellt.

#### **4.2.2 Empirische Untersuchung zur Erhebung der Nutzerfähigkeiten und -bedürfnisse**

Die nachfolgende Erhebung gehört als Bestandteil der Analysephase zum ersten Schritt der nutzerzentrierten Entwicklung (siehe Kap. 2.5). Das Ziel dieser empirischen Untersuchung ist es, die potenziellen Nutzer anhand ihrer bisher ausgeführten Arbeitsinhalte und der in der Zusammenarbeit mit ihnen gesammelten Erfahrungen zu analysieren und den erforderlichen Unterstützungsbedarf einzuschätzen, den ein Kommissionierassistenzsystem adressieren muss. Die dabei gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse dienen als grundlegende Voraussetzung für den weiteren hard- und softwareseitigen Entwicklungsverlauf.

Die Inhalte und Ergebnisse dieser Studie wurden auf der „International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA)“ vorgestellt und publiziert (vgl. Baechler et al. 2015b) und werden daher nachfolgend nur insoweit dargestellt, wie es für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erforderlich ist.

##### ***Methodische Vorgehensweise***

Die Erhebung zur Analyse der Nutzerfähigkeiten und -bedürfnisse erfolgt als Expertenbefragung auf Basis eines selbstentwickelten standardisierten Fragebogens (siehe Anhang S. 166). Der Fragebogen wird dabei vom Fachpersonal über leistungsgeminderte Mitarbeiter der betrachteten WfbM ausgefüllt (pro Mitarbeiter ein Fragebogen). Diese Erhebungsform der „stellvertretenden Expertenaussagen“ wurde gewählt, da Dialoge mit leistungsgeminderten Menschen meist nur bruchstückhaft gelingen, bzw. diese sich häufig nicht verbal artikulieren oder Fragen nicht adäquat verstehen können (siehe Kap. 8.1.5). Für diese Zielgruppe, die nicht oder oftmals nur sehr eingeschränkt für sich selbst sprechen kann, bietet sich die stellvertretende Beantwortung der Fragen durch vertraute Personen als Alternativlösung an, insofern die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind (vgl. Seifert 2006).

Der Stellvertreter muss

- über umfassende Kenntnisse des Arbeitsalltags des Betroffenen aus eigener Anschauung verfügen,
- die Möglichkeit zur differenzierten Beobachtung seines Verhaltens in unterschiedlichen Arbeitssituationen haben,
- die Möglichkeit zur intensiven Auseinandersetzung mit seinen arbeitsgeschichtlichen Erfahrungen haben und
- eine konkrete Vorstellung von den individuellen Bedürfnissen des Betroffenen haben (vgl. Hensel 2001).

Durch den Einsatz eines selbstentwickelten Fragebogens bietet sich der Vorteil, objektive Ergebnisse zu erhalten und statistisch auswerten zu können. Der verwendete Fragebogen wurde in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Ingenieuren, Psychologen, Pädagogen und dem betreuenden Fachpersonal der WfbM entwickelt und lässt sich in drei Hauptteile untergliedern. Der erste Teil bezieht sich auf die demografischen Daten und die Beeinträchtigungsart der einzelnen Person. Der zweite Teil umfasst eine Beschreibung und eine bildliche Darstellung eines ersten Grobkonzeptes für ein Kommissionierassistenzsystem. Der letzte Teil umfasst sieben Fragen zu den Fähigkeiten und Bedürfnissen der potenziellen Nutzer. Die Fragen erheben Informationen zur Einschätzung des jeweils zu erwartenden persönlichen Nutzens, zur motorischen, kognitiven und sensorischen Leistungsfähigkeit, zur Farbunterscheidung und -interpretation, zum Zahlenverständnis und zum

individuell erforderlichen Unterstützungsbedarf für den Einzelnen. Die Mehrheit der Fragen weist ein dichotomes Antwortformat (Ja oder Nein) auf. Zusätzlich besteht jeweils die Möglichkeit zu einer individuellen Begründung und Ausführung der Antwort. Für eine genauere Einschätzung der kognitiven und motorischen Fähigkeiten der Mitarbeiter wird eine fünfstufige Likert-Skala eingesetzt, welche von „keine Einschränkung“ bis zu „sehr starke Einschränkung“ reicht.

Die Auswahl der einzuschätzenden Mitarbeiter erfolgt beliebig unter den in der WfbM tätigen leistungsgeminderten Mitarbeitern. Als einzige Voraussetzung mussten diese körperlich in der Lage sein, potenziell an einem Assistenzsystem zu arbeiten und ein niedriges bis mittleres Leistungsniveau aufweisen (siehe Kap. 4.2.1). Aufgrund dieser Eingrenzung entspricht die Auswahl der leistungsgeminderten Teilnehmer nicht dem Durchschnitt der in der WfbM tätigen Mitarbeiter, wodurch die nachfolgenden Ergebnisse nicht als repräsentativ betrachtet werden können.

### Ergebnisse

Die Fragebogenerhebung umfasst eine Stichprobengröße von 78 Teilnehmern, wovon 23 weiblich (29,49 %) und 55 männlich (70,51 %) sind. Das Alter der Teilnehmer reicht von 23 bis 65 Jahren und liegt im Durchschnitt bei 45,0 Jahren (SD= 9,5). Die an der Fragebogenerhebung indirekt teilnehmenden Mitarbeiter weisen zwei unterschiedliche Behinderungsarten auf. Von den insgesamt 78 leistungsgeminderten Teilnehmern sind 30 Mitarbeiter (38,5 %) psychisch und 48 Mitarbeiter (61,5 %) geistig behindert (siehe Tabelle 2). Nach Einschätzung des pädagogischen Fachpersonals können insgesamt 67 Mitarbeiter bei ihren Tätigkeiten von einem Assistenzsystem profitieren und 11 Mitarbeiter nicht davon profitieren.

Tabelle 2: Kreuztabelle Behinderungsart und erwarteter Profit durch das Assistenzsystem (N= 78)

<u>Behinderungsart</u>	<u>Profit durch das Assistenzsystem</u>		<u>Σ Gesamt</u>
	<u>JA</u>	<u>NEIN</u>	
<b>psychisch behindert</b>	23 (76,7 %)	7 (23,3 %)	30 (100 %)
<b>geistig behindert</b>	44 (91,7 %)	4 (8,3 %)	48 (100 %)
<b>Σ Gesamt</b>	67 (85,9 %)	11 (14,1 %)	78 (100 %)

(Prozentangaben beziehen sich auf die jeweilige Zeile)

Das Fachpersonal traut es 72 (92,3 %) der bewerteten Mitarbeiter kognitiv und auch motorisch zu, an einem Assistenzsystem zu arbeiten. In Bezug auf die kognitiven und motorischen Fertigkeiten ist bei näherer Analyse der Stichprobe zu erkennen, dass bei den eingeschätzten Mitarbeitern kognitive Einschränkungen deutlich stärker als motorische Einschränkungen vertreten sind.

74 (94,9 %) der Mitarbeiter sind nach Aussage des Fachpersonals in der Lage, zwei Farben voneinander zu unterscheiden und diese richtig zuzuordnen. Laut Einschätzung des Fachpersonals sind 64 (82,1 %) Mitarbeiter der Stichprobe in der Lage, zwei akustische Signale voneinander zu unterscheiden und diese richtig zuzuordnen.

Auch das Einhalten einer Reihenfolge von Entnahmeschritten und das Befolgen einfacher Anweisungen, welche das Assistenzsystem vorgeben könnte, stellen nach Angaben des Fachpersonals für 69 (88,5 %) Mitarbeiter keinerlei Schwierigkeit dar.

Zudem sind laut Fachpersonaleinschätzung 54 (69,2 %) Mitarbeiter in der Lage, Zahlen zu verstehen. Der Modalwert liegt bei einem Zahlenverständnis bis 100. Betrachtet man das Zahlenverständnis in Bezug auf die Behinderungsart, so zeigt sich, dass psychisch behinderte Menschen zu einem großen

Teil (N= 22) über ein hohes Zahlenverständnis verfügen (Modalwert und größer). Von den Menschen mit geistiger Behinderung hingegen verfügen nur neun der eingeschätzten Personen über ein Zahlenverständnis bis 100.

Die letzte Frage zielt auf einen möglichen Unterstützungsbedarf ab bzw. Bedingungen, die gegeben sein müssen, damit die Mitarbeiter gerne und effektiv am Kommissionierassistenzsystem arbeiten. Die häufigsten Antworten sind hierbei: Eine (gelegentliche) Unterstützung der Fachkraft muss gegeben sein, um beispielsweise bei Krisen individuell intervenieren zu können (N= 31). Ebenso wird unter anderem die Wichtigkeit von regelmäßigen Pausen (N= 29), einer reizarmen Umgebung (N= 25), klar vorgegebenen Anweisungen (Anleitung durch Zahlen N= 18, Bilder N= 17, Töne N= 6), einer geführten Fortbewegung des Kommissionierwagens (N= 13) und Erfolgsmeldungen (N= 6) genannt, die für einen erfolgreichen Einsatz des Assistenzsystems beachtet werden sollten.

### ***Diskussion und Ausblick***

Die Ergebnisse zeigen, dass nach Einschätzung des Fachpersonals 85,9 % (N= 67) der beurteilten leistungsgeminderten Mitarbeiter bei der Ausübung von Kommissioniertätigkeiten von dem konzeptionell beschriebenen Assistenzsystem profitieren könnten. Ebenso sind nahezu alle beurteilten Mitarbeiter kognitiv sowie motorisch in der Lage, mit einem Assistenzsystem in der beschriebenen Art zu arbeiten. In der vorliegenden Stichprobe sind die kognitiven Beeinträchtigungen deutlich stärker als die motorischen ausgeprägt; das ist – wie oben dargelegt – in WfbMs meist der Fall. Aus diesem Grund sollte besonderes Augenmerk darauf gerichtet werden, mit dem Assistenzsystem die kognitiven Einschränkungen der leistungsgeminderten Mitarbeiter zu kompensieren. Welche Auswirkungen die kognitiven und motorischen Einschränkungen der leistungsgeminderten Mitarbeiter auf die Nutzung des Assistenzsystems haben können, wird sich allerdings erst bei dessen Einsatz zeigen (siehe Kap. 9). Betrachtet man den Zusammenhang zwischen den Behinderungsarten der leistungsgeminderten Menschen in der WfbM und den „Nutzeneinschätzungen“ durch ein Assistenzsystem von Seiten des Fachpersonals, fällt auf, dass nach deren Einschätzung die Gruppe der Mitarbeiter mit einer psychischen Behinderung weniger durch einen Einsatz des Assistenzsystems profitieren könnte als die geistig behinderten Mitarbeiter (vgl. Tabelle 2). Eine mögliche Begründung hierfür könnte sein, dass Menschen mit einer psychischen Behinderung im Regelfall keine motorischen oder kognitiven Beeinträchtigungen aufweisen. Die individuellen Defizite dieser Personengruppe beziehen sich meist auf Dimensionen wie Ermüdbarkeit, mangelnde Frustrationstoleranz und affektive Labilität. Darüber hinaus könnte der Einsatz des Assistenzsystems als neue Technologie gerade bei Mitarbeitern mit dieser Behinderungsart eine nicht tragbare Beanspruchung darstellen bzw. diese überfordern, wodurch ein gegenteiliger Effekt erzeugt werden könnte (vgl. Bächler et al. 2015b).

Die für die Kommissionierung erforderlichen Fähigkeiten der Farbunterscheidung, des Zahlenverständnisses bis 50 und des Einhaltens einer Kommissionierreihenfolge stellen laut Fachpersonaleinschätzung für die Mehrheit der leistungsgeminderten Mitarbeiter kein Problem dar. Auch die von Seiten des Fachpersonals zusätzlich geforderten Unterstützungsaspekte, welche für ein zufriedenstellendes und effektives Arbeiten der leistungsgeminderten Mitarbeiter erforderlich sind, erscheinen umsetzbar. Die Bedingungen wie z.B. das geführte Verschieben des Kommissionierwagens, die Anleitung durch Zahlen und Bilder oder der Einsatz von Erfolgsmeldungen werden bei der weiteren Entwicklung des Assistenzsystems mit einbezogen (siehe Kap. 5.2 und Kap. 5.3) und berücksichtigt, soweit sie mit den gegebenen Ressourcen umsetzbar sind. Weitere Aspekte wie z.B. die Unterstützung durch Fachkräfte, um bei Krisen individuell intervenieren zu können, eine reizarme Umgebung, klar vorgegebene Strukturen oder das Einhalten von regelmäßigen Pausen während der Nutzung eines

solchen Assistenzsystems finden beim späteren Einsatz besondere Berücksichtigung. Ebenso müssen vor dem ersten Einsatz vertiefende und aufklärende Informationen, Einweisungen und Demonstrationen für die leistungsgeminderten Nutzer erfolgen, um die Akzeptanz zu erhöhen. Das entspricht den Forderungen des Fachpersonals nach einer intensiven Einlernphase mit praktischer Erprobung.

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die bisherigen Erkenntnisse aus Untersuchungen mit vergleichbaren Zielgruppen und Unterstützungssystemen aus dem Montagebereich und führen zu der differenzierten Indikation der Zielgruppe der vorliegenden Arbeit, nämlich primär auf Menschen mit geistiger Behinderung, welche nachfolgend als leistungsgeminderte Mitarbeiter bezeichnet werden. Neben der Eingrenzung des zukünftigen Nutzerkreises liefern die Studienergebnisse wichtige Rahmenbedingungen und Erkenntnisse über die Nutzer und deren Fähigkeiten bzw. Bedürfnisse, die für die weitere Entwicklung und anschließende Evaluierung des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse von grundlegender Bedeutung sind.

### **4.3 Ableitung von Handlungsfeldern**

Der in Kapitel 4.1 beschriebene Kommissionierprozess in der WfbM ist vom Aufbau und Ablauf größtenteils identisch mit den im industriellen Umfeld gängigen manuellen und papierbasierten Kommissioniervorgängen (siehe Kap. 3.1.1). Zukünftig ist es in der WfbM jedoch das Ziel, nicht mehr nur normal leistungsfähige Mitarbeiter in diesem intralogistischen Prozess einzusetzen, sondern vor allem auch leistungsgeminderte Mitarbeiter zu befähigen, die erforderlichen Kommissioniertätigkeiten durchzuführen. Hierfür ist die derzeit eingesetzte Anleitung in Papierform jedoch kein ausreichendes und nutzergerechtes Medium der Informationsbereitstellung. Allerdings bieten auch die weiteren gängigen und verfügbaren Kommissionierverfahren (siehe Kap. 3.1 bis Kap. 3.3) keine ausreichende intuitive Verständlichkeit, Ergonomie, individuelle Gestaltbarkeit und Prozesssicherheit, um leistungsgeminderte Mitarbeiter unter den Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts (siehe Kap. 1.1) adäquat im Kommissionierbereich einzusetzen.

Zusätzlich ist es nicht nur für die zukünftige Nutzergruppe der leistungsgeminderten Mitarbeiter, sondern bereits in der bestehenden Ausgangssituation erforderlich die Prozesssicherheit und den Qualitätsstandard zu erhöhen und auftretende Fehler zu vermeiden bzw. diese direkt beim Auftreten zu erkennen und zu beheben. Der bestehende Trend zu kundenindividuellen Produkten führt auch innerhalb der WfbM zu sinkenden Losgrößen und einer steigenden Variantenvielfalt, wodurch die Umschlagshäufigkeit bzw. die Komplexität in diesem intralogistischen Bereich ansteigt. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Ausdauer und Konzentration der derzeit eingesetzten Mitarbeiter stark erhöhen, was den Einsatz von leistungsgeminderten Mitarbeitern beinahe unmöglich erscheinen lässt.

Einen erfolgsversprechenden Lösungsansatz zur Bewältigung der genannten Herausforderungen können jedoch informationstechnische und kognitionsunterstützende Assistenzsysteme (siehe Kap. 2.4.2), wie sie bereits aus dem Fahrzeugbereich oder dem Montagebereich bekannt sind, darstellen (siehe Kap. 2.4.1 und Kap. 3.4). Dabei bezwecken solche Assistenzsysteme in der Produktion, durch eine kontextsensitive Anleitung, Erfassung und Kontrolle der Arbeitsprozesse eine nutzerzentrierte und kognitive Unterstützung sowohl für leistungsgeminderte als auch für normal leistungsfähige Mitarbeiter (vgl. Reinhart und Zäh 2014). Gerade im Fall der vorliegenden komplexen logistischen Tätigkeit der auftragsbezogenen Kommissionierung bei kleinen Losgrößen und hoher Variantenvielfalt ist auch für normal leistungsfähige Mitarbeiter ohne Unterstützung keine sichere Ausübung des Arbeitsprozesses möglich. Daher sind momentan kaum leistungsgeminderte Mitarbeiter in



logistischen Unternehmensbereichen zu finden. Durch den Trend zur Just-in-Time- bzw. -Sequence-Produktion, der sich auch auf WfbMs auswirkt, steigt jedoch gerade dort der Bedarf an Mitarbeitern innerhalb der logistischen Prozesse.

Um die Diskrepanz zwischen der Nutzerzielgruppe der leistungsgeminderten Mitarbeiter, der vorliegenden Arbeitsaufgabe eines Kommissionierprozesses sowie den vorhandenen Arbeitsmitteln bzw. des Hardwareaufbaus überbrücken zu können, ist es erforderlich, ein nutzerzentriertes Assistenzsystem zu entwickeln (siehe Abbildung 29).

Das Assistenzsystem soll so gestaltet sein, dass die entsprechenden Nutzer es mit ihren individuellen Fähigkeiten und Bedürfnissen verwenden wollen, es zum anderen aber auch unabhängig von ihren Vorkenntnissen verstehen können und sich damit schlussendlich auch in ihren Fähigkeiten weiterentwickeln. Zudem soll das Assistenzsystem den Kontext der Unterstützungssituation und die menschliche Interaktion dynamisch erfassen und sich adaptiv daran ausrichten<sup>13</sup>.

Als Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung eines solchen Systems werden nachfolgend – in einem weiteren Schritt der nutzerzentrierten Entwicklung – situationsabhängige Anforderungsprofile aus der Perspektive der potenziellen Nutzer, unter Berücksichtigung des auszuführenden Prozesses und schließlich im Blick auf die Technik betrachtet und analysiert.



Abbildung 29: Der Einsatz eines Assistenzsystems als Bindeglied zwischen den leistungsgeminderten Mitarbeitern (Arbeitspersonen), dem vorhandenen Hardwareaufbau (Arbeitsmittel) und dem Kommissionierprozess (Arbeitsaufgabe)

<sup>13</sup> Die Entwicklung von adaptiven Elementen und eine anschließende Realisierung mit verschiedenen Adaptivitätsstufen wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher behandelt.

## 5 Spezifikation der Anforderungen an ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für manuelle Kommissionierprozesse

In Weiterführung der in Kapitel 1.1 beschriebenen Problemstellung wurde im vorhergehenden Kapitel eine Situationsanalyse durchgeführt und als geeignetes Handlungsfeld die Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für manuelle Kommissionierprozesse abgeleitet.

Im vorliegenden Kapitel werden nun – in der zweiten Phase der nutzerzentrierten Entwicklung (siehe Kap. 2.5) – als Voraussetzung für die Konzeption und Entwicklung dieses technischen Unterstützungssystems die Anforderungen zum einen von Seiten der Arbeitsaufgabe bzw. des Prozesses innerhalb der PzW-Kommissionierung und der Technik sowie zum anderen aus der Perspektive der zukünftigen Nutzer (unter anderem auf Basis der empirischen Erhebung des vorhergehenden Kapitels) spezifiziert (siehe Abbildung 30). Dabei lassen sich die einzelnen Anforderungskriterien oftmals nicht nur einer Kategorie zuordnen, sondern überschneiden sich häufig in ihrer inhaltlichen Zugehörigkeit.

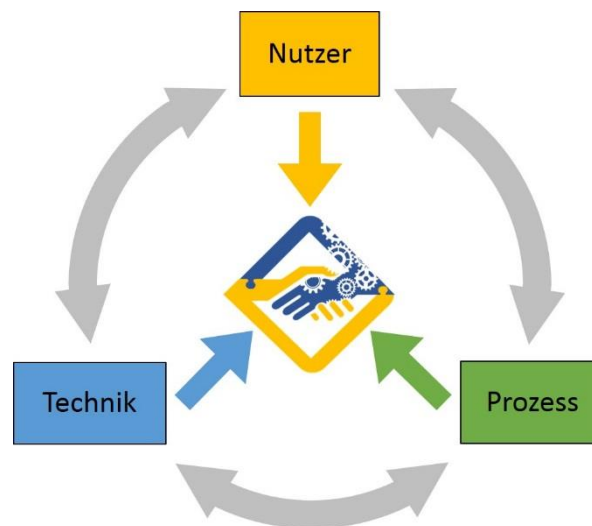


Abbildung 30: Anforderungen an ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für manuelle Kommissionierprozesse

Abschließend werden auf Basis der ermittelten Anforderungen konkrete Zielsetzungen für das nutzerzentrierte Assistenzsystem für leistungsgeminderte Mitarbeiter bei manuellen Kommissioniertätigkeiten abgeleitet.

### 5.1 Anforderungsprofil von Seiten des Kommissionierprozesses

Jedes Kommissioniersystem besteht aus zwei wesentlichen Prozessen: Zum einen aus dem Zusammenführungsprozess von Kommissionierer und dem zu kommissionierenden Artikel in der entsprechenden Bereitstellungsform, welcher im vorliegenden Fall durch das PzW-System als Bewegung des Kommissionierers definiert ist (siehe Kap. 4.1.2). Zum anderen aus dem Bearbeitungsprozess (als Kernaufgabe der Kommissionierung), welcher alle Tätigkeiten beinhaltet, die an einem festen Ort durchgeführt werden, wie z.B. das Entnehmen von Teilmengen oder einer gesamten Ladeinheit respektive das Ablegen des Sammelbehälters auf dem Kommissionierwagen (vgl. Hoppel et al. 2011).

Für die erfolgreiche Realisierung eines anforderungs- und nutzerzentrierten Assistenzsystems ist es im Vorfeld der Planung erforderlich, die qualitativen und quantitativen Kenngrößen dieser beiden Prozesse zu bestimmen, um diese anschließend in die Konzeption und Entwicklung mit einbeziehen zu

können. Die Festlegung der Kenngrößen resultiert zum einen aus der Analyse des derzeitigen Kommissionierprozesses der betrachteten WfbM (siehe Kap. 4.1) und orientiert sich zum anderen an verschiedenen Richtlinien und Normen, wie z.B. der VDI 3590 (vgl. Hompel et al. 2011; VDI-Richtlinie 3590, Blatt 2).

#### **5.1.1 Qualitative Kriterien**

Die Entwicklung eines Kommissionierassistenzsystems wird maßgeblich von Vorgaben beeinflusst, die nicht mittels Zahlenwerten wiedergegeben werden können, jedoch im Zuge der Umsetzung des Kommissionierassistenzsystems trotzdem erfüllt werden sollten.

Hierzu gehören u.a. folgende Kriterien:

##### ***Flexibilität des Personaleinsatzes und der Kommissionierstrategie***

Um kurzfristige Auftrags- oder Leistungsschwankungen der Kommissionierer innerhalb einer Zeitperiode abdecken zu können, muss das zu entwickelnde Kommissioniersystem in Bezug auf den Personaleinsatz und die Kommissionierstrategie flexibel gestaltet sein. Konkret bedeutet dies, dass es durch die soft- und hardwareseitige Gestaltung möglich sein muss, dass auch mehrere Personen parallel mit dem Assistenzsystem arbeiten bzw. mehrere Kommissionieraufträge gleichzeitig kommissioniert werden, um dadurch die Systemleistung bedarfsgerecht anpassen zu können.

##### ***Universalität des Artikelspektrums***

Damit das entwickelte Assistenzsystem zukünftig ein breites Anwendungsspektrum abdecken kann, ist es erforderlich, dessen Ausführung in Bezug auf die Nutzung mit verschiedenen Artikeln möglichst vielseitig zu gestalten. Dies bedeutet, dass eine Verwendung des Assistenzsystems bei Artikelsortimenten mit unterschiedlichen Abmessungen und Gewichten ohne Einschränkung möglich sein sollte.

#### **5.1.2 Quantitative Kriterien**

Die quantitativen Kenngrößen, bestehend aus den betriebswirtschaftlichen Zielgrößen des Gewinns und der Produktivität sowie den servicerelevanten Anforderungen hinsichtlich der Kommissionierzeit bzw. der -leistung spielen in der betrachteten WfbM eine untergeordnete Rolle. Das primäre Ziel der WfbM ist es nicht, eine Gewinnmaximierung durch gesteigerte Produktivität zu erreichen, sondern ihre Mitarbeiter unter – für die Zielgruppe förderlichen – Arbeitsbedingungen zu beschäftigen (vgl. § 136, SGB IX), die bezogen auf die auszuübenden Arbeitsprozesse und -tätigkeiten mit denen des allgemeinen Arbeitsmarkts vergleichbar sind (siehe Kap. 5.2.1). Damit soll ein wichtiger Beitrag für eine inklusive Arbeitswelt geleistet und für geeignete Personen ein Übergang in den ersten Arbeitsmarkt ermöglicht werden (siehe Kap. 2.3.4).

Die vier nachfolgenden quantitativen Kenngrößen spielen für die Entwicklung des Kommissionierassistenzsystems eine maßgebliche Rolle.

##### ***Strukturelle Kennzahlen***

Die Parameter der vorliegenden Artikel- und Auftragsstruktur stellen wesentliche Anforderungen an die Entwicklung von Lösungskonzepten. Die relevanten strukturellen Kenngrößen lassen sich in die drei verschiedenen Kategorien der

- Auftragsstruktur (z.B. Anzahl eingehender Kunden- bzw. Kommissionieraufträge pro Zeiteinheit),
- Artikelstruktur (z.B. Angaben über die zahlenmäßige Größe des gesamten Artikelstamms) und

- Kommissionier- und Lagertechnik (z.B. Art der verwendeten Ladehilfs- und Lagermittel) aufteilen.

Die zahlenmäßige Erfüllung dieser Kenngrößen ergibt sich aus den ermittelten Daten der Analyse des Kommissionierprozesses in der betrachteten Werkstatt, welche bereits in Kapitel 4.1 dargestellt wurden.

### **Qualitätskennzahlen**

Im vorliegenden Anwendungsfall kommt der Kommissionierfehlerquote als quantitativer Kennzahl die größte Bedeutung zu. Auch wenn die betriebswirtschaftlichen und leistungsbezogenen Aspekte nicht ganz außer Acht gelassen werden können, stellt die Vermeidung von Fehlern innerhalb des Kommissionierprozesses und die damit einhergehende Beibehaltung bzw. Erhöhung der Prozesssicherheit und des Qualitätsstandards bei der Kommissionierung mit leistungsgeminderten Mitarbeitern die wichtigste Voraussetzung für einen kundenseitig erfolgreichen Einsatz des Kommissionierassistenzsystems dar. Eine hohe Kommissionierfehlerrate kann nicht nur zum Vertrauensverlust des Kunden führen, sondern auch hohe direkte und indirekte Kosten zur Folge haben. Das zu entwickelnde Assistenzsystem soll zukünftig auch im Zuliefererbereich für die Automobilindustrie der WfbM zum Einsatz kommen, weshalb an dieses die dort üblichen hohen Qualitätsanforderungen und -standards nach der DIN ISO 9001 gestellt werden (vgl. DIN EN ISO 9001). Die Kommissionierqualität wird auch für den vorliegenden Anwendungsfall nach VDI 4490 mit der Kenngröße der Kommissionierfehler nach den Fehlerarten des Typ-, Mengen-, Zustands- und Auslassungsfehlers (siehe Kap. 2.1.1) quantifiziert und darf im vorliegenden Praxiseinsatz eine maximale Gesamtfehlerquote von 0,1 %<sup>14</sup> nicht überschreiten (vgl. VDI - Richtlinie 4490; Lolling 2003).

### **Betriebswirtschaftliche Kennzahlen**

Die Kommissionierkosten ergeben sich aus der Summe aller Kosten, die im Kommissionierbereich anfallen. Dies sind u.a.

- Personalkosten,
- Material- und Technikkosten sowie
- Energie- und Instandhaltungskosten.

Da im vorliegenden Fall, wie bereits erwähnt, die Wirtschaftlichkeit nicht im Vordergrund steht, wird kein besonderer Schwerpunkt auf die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen gelegt. Trotzdem müssen mit den innerhalb der WfbM zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln und Hilfen die Bedürfnisse der leistungsgeminderten Menschen bestmöglich erfüllt werden (siehe Kap. 5.1). Im Zusammenhang mit dem aktuellen Trend, eine immer größer werdende Anzahl von Hilfeempfängern mit weniger Ressourcen und finanziellen Mitteln zu versorgen, soll das zu entwickelnde Assistenzsystem einen wichtigen Beitrag für eine individuelle Einbeziehung in das Arbeitsleben leisten (vgl. § 81 Abs. 4, SGB IX). Ebenso dient es zur Kompensation des aktuellen Abbaus des Betreuungspersonals innerhalb der WfbMs.

In der vorliegenden Arbeit steht für die Entwicklung und Realisierung des Assistenzsystems in einer Laborumgebung ein Investitionsbudget von maximal 10.000 € als Material- und Technikkosten zur Verfügung.

---

<sup>14</sup> Dies entspricht einer Fehlerrate von 1.000 Fehlern pro einer Million kommissionierter Positionen. Übliche Fehlerraten in der Industrie mit den derzeit üblichen Kommissioniertechniken sind 0,3 bis 1,5 % (3.000 – 15.000 Fehler pro einer Million Positionen) (vgl. Fischer 1994; Lolling 2003).

### **Leistungskennzahlen**

Die Systemleistung wird in der Kommissionierung üblicherweise über die abgearbeitete Anzahl der Aufträge, Positionen oder Entnahmegriffe in einem bestimmten Zeitfenster ausgedrückt. Im vorliegenden Fall liegt diese maximal erforderliche Systemleistung bei wöchentlich bis zu 25 Aufträgen mit maximal 25 Positionen pro Auftrag (siehe Kap. 4.1.2).

Unter der Annahme, dass in der WfbM mit einer Regelarbeitszeit von 35 h pro Woche kommissioniert wird, muss die Systemleistung bei etwa 18 zu kommissionierenden Positionen pro Stunde liegen, um die maximale Anzahl an Aufträgen bewältigen zu können. Diese maximal zu erbringende Kommissionierleistung spiegelt allerdings nur die systemseitig erforderliche Leistung wider und bedeutet nicht, dass ein entsprechender Nutzer diese Leistung erbringen muss. In der Praxis können die anstehenden Kommissionieraufträge auf mehrere Mitarbeiter aufgeteilt und somit über eine gemittelte Nutzerleistung erbracht werden. Die hier festgelegte Systemleistung soll darüber hinaus weder als Leistungskennzahl für genaue Vorgaben in Bezug auf die Produktivität, noch als Bewertungsgrundlage für die Wirtschaftlichkeit des Assistenzsystems dienen.

Da bei den in Kapitel 8 und 9 dargestellten Evaluierungen die Anzahl der zu kommissionierenden Positionen konstant ist, wird dort als Kennzahl für die Effizienz nicht die Systemleistung, sondern die Dauer des Kommissioniervorgangs mittels der Kommissionierzeit herangezogen (vgl. Hompel et al. 2011; VDI-Richtlinie 3590, Blatt 2).

## **5.2 Anforderungsprofil von Seiten der leistungsgeminderten Mitarbeiter**

Die einzige Erfolg versprechende Methode für die Gestaltung eines technischen Systems bzw. Produkts ist es, den Nutzer mit seinen Fähigkeiten, Grenzen und Anforderungen in den Mittelpunkt zu stellen und die Technik konsequent an ihm auszurichten (vgl. Zühlke 2012) (siehe Kap. 2.5). Deshalb ist es im Zuge der nutzerzentrierten Entwicklung erforderlich, aus den ermittelten Nutzerfähigkeiten und -bedürfnissen (siehe Kap. 4.2) entsprechende Anforderungen abzuleiten, um diese anschließend bei der weiteren Konzeption und Entwicklung konkret berücksichtigen zu können. Dadurch soll sichergestellt werden, dass bei Einsatz des fertig entwickelten Assistenzsystems manuelle Kommissionierprozesse mit leistungsgeminderten Mitarbeitern erfolgreich bewältigt werden können. Aus den Analyseergebnissen des Arbeitskontextes und der Nutzergruppe (siehe Kap. 4), weiteren Erkenntnissen aus bisherigen Befragungen und Evaluierungen mit leistungsgeminderten Mitarbeitern (im speziellen mit geistiger Behinderung und im Kontext der Nutzung von technischen Assistenzsystemen im Produktionsumfeld, siehe Kap. 4.2.1) sowie auf Basis von bisherigen Arbeiten im Bereich der Entwicklung von Unterstützungssystemen für die manuelle Kommissionierung (vgl. Reif 2009; Wölflé 2014) werden die folgenden spezifischen Anforderungen abgeleitet. Diese werden gemeinsam mit Vertretern der leistungsgeminderten Mitarbeiter, pädagogischen und technischen Fachkräften sowie Psychologen erarbeitet.

### **5.2.1 Anforderungen an die Arbeitsgestaltung für leistungsgeminderte Mitarbeiter**

Die im Folgenden genannten Anforderungen müssen für die erfolgreiche Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für leistungsgeminderte Mitarbeiter bei manuellen Kommissioniertätigkeiten besondere Beachtung finden.

### ***Menschengerechte Arbeitsgestaltung***

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Gestaltung eines Arbeitsplatzes für leistungsgeminderte Menschen die Kriterien menschengerechter Arbeitsgestaltung erfüllen muss. Darüber hinaus bedeutet die Gestaltung von Arbeitsaufgaben und -bedingungen für leistungsgeminderte Mitarbeiter eine individuelle Anpassung an die jeweils vorhandenen Potenziale und Einschränkungen.

Menschengerechte Arbeit bedeutet, dass

- ausführbare, schädigungslose, beeinträchtigungsfreie und erträgliche Arbeitsbedingungen vorliegen,
- Standards sozialer Angemessenheit nach Arbeitsinhalt, -aufgabe, -umgebung sowie Entlohnung und Kooperation erfüllt sind und
- die arbeitenden Menschen Handlungsspielräume erhalten, Fähigkeiten erwerben und in Kooperation mit anderen ihre Persönlichkeit entfalten und entwickeln können (vgl. Luczak et al. 1989).

Die Berücksichtigung der Kriterien menschengerechter Arbeit bietet ein hinreichend sicheres Fundament auch für die Arbeitsgestaltung für leistungsgeminderte Menschen, wobei aus Gründen der Relevanz für diese Zielgruppe die Kriterien „Ausführbarkeit“, „Schädigungsfreiheit“ sowie „Persönlichkeitsförderlichkeit“ besondere Bedeutung haben (vgl. Schubert 1996; Luczak et al. 1989).

Eine menschengerechte Arbeitsgestaltung muss laut einschlägiger Fachliteratur innerhalb der Arbeitswissenschaft, -psychologie und -medizin „ausführbar“ sein. In Bezug auf die Arbeitsgestaltung für leistungsgeminderte Menschen heißt das, dass von der Arbeitsaufgabe keine Anforderungen ausgehen dürfen, welche die Person aufgrund ihrer Funktionseinschränkungen nicht erfüllen kann. Der Ausführungsaspekt gilt dann als erfüllt, wenn die Voraussetzungen für eine zuverlässige, forderungsgerechte und langfristige Ausführung der Tätigkeit gegeben sind (vgl. Seyfried 1990).

Ebenso muss für eine menschengerechte Arbeitsgestaltung das Kriterium der „Schädigungsfreiheit“ erfüllt sein. Durch die Tätigkeit dürfen keine in den normalen Erholungszeiten nicht regenerierbare oder behandlungsbedürftige physische oder psychophysische Schädigungen hervorgerufen werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium, welches im SGB IX gesetzlich verankert ist, stellt die Förderung der Persönlichkeit durch Arbeit dar. Darunter ist u.a. das Ausmaß zu verstehen, in dem die Arbeitstätigkeit zu einer Förderung der kognitiven Kompetenz sowie zu einer Differenzierung eines realistischen Selbstkonzepts beiträgt (vgl. Schubert 1996). Hervorgehoben wird dadurch, dass Arbeit eine Gelegenheit mit sich bringen sollte, vorhandene Fertigkeiten weiterzuentwickeln und Fähigkeiten auszuschöpfen.

Zusammenfassend versteht die vorliegende Arbeit unter behinderungsgerechtem Gestalten die Anpassung „technischer Erzeugnisse und nichtgegenständlicher Maßnahmen an die Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnisse von Menschen mit Behinderungen, mit dem Ziel, die Auswirkungen von funktionellen Einschränkungen zu verringern oder zu beseitigen und eine weitgehende Selbstständigkeit und Unabhängigkeit zu fördern“ (DIN 32977, S. 1).

### ***Integration einer Lern- und Qualifizierungsfunktion***

Die Nutzung des Assistenzsystems soll ein prozessbegleitendes und praxisgebundenes Aufgabenlernen als natürlichste Lernform der Arbeitstätigkeit ermöglichen (vgl. Hacker und Sachse 2014). Durch eine detaillierte visuelle „Schritt-für-Schritt“-Anleitung sollen sich die Mitarbeiter mit ihren kognitiven und motorischen Fähigkeiten im Wesentlichen durch praktisches Üben weiterentwickeln und ihr Wissen im Rahmen der Arbeitsaufgabe ausbauen. Die Umsetzung einer adaptiven Informationsbereitstellung ermöglicht zusätzlich ein individualisiertes Qualifikationsniveau und -tempo.

Des Weiteren können über „Lernabstinenz“ aufgebaute Negativhaltungen und Defizite der Mitarbeiter, wie z.B. Abwehr und mangelndes Selbstvertrauen, abgebaut werden, da mit Hilfe des Assistenzsystems nicht mehr wie bisher üblich fachlich-theoretisch organisierte Lernformen, sondern vor allem sprach- und kognitionsgestützte Lernverfahren zum Einsatz kommen (vgl. Hacker und Sachse 2014). Der größte Vorteil des aufgabenbezogenen Lernens ist jedoch, dass das Lernen parallel zum ausgeübten Arbeitsprozess erfolgt und primär über visuelle Informationen ausdrucksstark unterstützt und umgesetzt werden kann. Darüber hinaus können Einlernphasen ohne Zeit- und Leistungsdruck prozessbegleitend durchgeführt, eine stressfreie Eingewöhnung an das Assistenzsystem bzw. die Kommissioniertätigkeit ermöglicht und das Betreuungspersonal entlastet werden (vgl. Bächler et al. 2015b).

### ***Ergonomische Gestaltung***

Da die Kommissionierung sowohl von einzelnen Artikeln als auch von gesamten Behältern möglich sein soll, ist es erforderlich, dass die Mitarbeiter für die Entnahme- und Ablageprozesse der Kommissioniertätigkeit dauerhaft beide Hände zur Verfügung haben (vgl. Richter 2015).

Darüber hinaus darf die technische Umsetzung der visuellen Informationsbereitstellung und automatischen Kontrolle die Mitarbeiter nicht in ihrer Bewegungsfreiheit und Sinneswahrnehmung behindern. Dies bedeutet, dass die technische Hardware nicht direkt mit dem Nutzer verbunden sein darf, sondern unabhängig und autark von ihm funktionieren muss. Die Mitarbeiter dürfen also für die Nutzung des Assistenzsystems weder eine Brille, einen Helm noch sonstige technische Komponenten am Körper tragen müssen, die sie in irgendeiner Weise beeinträchtigen könnten. Trotzdem sollen die erforderlichen Informationen mit einer möglichst hohen Helligkeit, Auflösung und Größe dargestellt werden, um so auch unter durchschnittlichen in der Industrie vorzufindenden Lichtverhältnissen eine gute Erkenn- und Lesbarkeit sicherzustellen.

Die hardwareseitige Gestaltung des Assistenzsystems mit den dazugehörigen Komponenten muss der Nutzerzielgruppe, die bei den Körpermaßen im Vergleich zum Bevölkerungsdurchschnitt deutlich kleinere Werte mit zusätzlich stärkeren Schwankungen vorweist (vgl. Bundesvereinigung Lebenshilfe e.V.) (siehe Kap. 9.3.1), ein ergonomisches Arbeiten ermöglichen, um damit einseitige Belastungen der Muskeln und des Herz-Kreislauf-Systems zu vermeiden. Als Grundlage zur ergonomischen Anpassung vor allem der hardwareseitigen Komponenten auf Basis der Anthropometrie dient die VDI-Richtlinie 3657 (vgl. VDI-Richtlinie 3657). Insoweit die technischen und finanziellen Möglichkeiten es zulassen, sollen bei der Entwicklung und Umsetzung auch Aspekte und Lösungsansätze der physischen Assistenz berücksichtigt und integriert werden (siehe Kap. 2.4.2).

### ***Anonymisierung der Nutzerdaten und des Datenschutzes***

Die nutzerzentrierte Ausführung des Assistenzsystems erfordert Kenntnisse über gewisse personenbezogene Informationen der Nutzer. Diese sollen jedoch so abgespeichert sein, dass für Bediener, Einrichter oder andere Systemnutzer weder deren Identität noch die abgespeicherten Prozessdaten erkennbar sind bzw. diese vor unberechtigten Zugriffen geschützt werden. Dadurch soll auch verhindert werden, dass nutzerbezogene Daten wie z.B. Kommissionierzeiten oder -fehler missbraucht werden, um die Nutzer zu bewerten oder anderweitige Rückschlüsse auf das Nutzerverhalten zu ziehen.

### 5.2.2 Anforderungen an die Informationsbereitstellung

Für die Bereitstellung von Informationen sind die nachfolgenden Anforderungen von Bedeutung.

#### ***Bedarfsgerechte und adaptive Informationsbereitstellung***

Für eine erfolgreiche Kommissionierung sind Informationen zum Artikelstand- bzw. Entnahmeort, zur Entnahmemenge sowie zum Ablageort erforderlich. Da innerhalb der betrachteten WfbM ein einreihiges Materiallager vorliegt, ist eine zusätzliche Navigation zum entsprechenden Lagergang nicht erforderlich. Neben der Anleitung eines Kommissionierprozesses sollen von dem Assistenzsystem auch Informationen für die Fehlerrückmeldung bzw. -behebung geboten werden. Darüber hinaus soll das Assistenzsystem die Nutzer unabhängig von ihrem Leistungsniveau (siehe Kap. 4.2.1) zu Kommissioniertätigkeiten befähigen. Hierfür muss die Informationsbereitstellung des Assistenzsystems so gestaltet sein, dass jeder Nutzer die für ihn erforderliche Unterstützung zur selbstständigen Ausführung von Kommissioniertätigkeiten schnell und zuverlässig erhält.

Im vorliegenden Kontext bedeutet dies, dass sich die Anleitung nach Art und dem Umfang der gebotenen Informationen (wie z.B. Text, Bild, Video) adaptiv an die Bedürfnisse des jeweiligen Nutzers anpasst. Dazu muss das Assistenzsystem automatisch und ohne zusätzliche Bedienung erkennen, wann ein Nutzer welche Informationen (Entnahmeort, Entnahmemenge, Ablageort etc.) benötigt. Dies bedeutet auch, dass das Assistenzsystem automatisch erkennen muss, ob bzw. ab welchem Zeitpunkt im Prozess ein Nutzer eine Aufgabe selbstständig bzw. ohne Unterstützung durchführen kann. Ab diesem Zeitpunkt soll das Assistenzsystem den Grad der Unterstützung reduzieren und entsprechende Anleitungshinweise nicht mehr anzeigen. Diese Eigenschaft des „Lernens“ soll zudem dafür sorgen, dass sich der Grad der Informationsbereitstellung wieder selbstständig erhöht, sobald anhand von Abweichungen verschiedener Parameter wie z.B. der Kommissionierzeit oder der Fehlerrate erkennbar ist, dass der Nutzer wieder auf zusätzliche Unterstützung angewiesen ist. Trotzdem muss das Handeln des Assistenzsystems für den Nutzer nachvollziehbar bleiben, so dass für diesen nicht das Gefühl entsteht, keine Kontrolle darüber zu haben.

#### ***Intuitive Informationsbereitstellung***

Die bereitgestellten Informationen zur Anleitung von Kommissioniertätigkeiten oder zur Behebung von fehlerhaft durchgeführten Vorgängen sollen so gestaltet sein, dass die Mitarbeiter diese unabhängig vom Grad ihrer Leistungsfähigkeit, ihrer Vorerfahrung, ihres Bildungsstandes und ihrer sprachlichen Kenntnisse intuitiv<sup>15</sup> verstehen und als auszuführende Handlung interpretieren können. Dadurch sollen sowohl die kognitive Beanspruchung der Mitarbeiter und die Dauer der Einlernphase als auch die Kommissionier-Totzeiten z.B. zum Lesen, Identifizieren, Interpretieren etc. reduziert werden (vgl. Hompel et al. 2011). Die entsprechenden Informationen sollen dabei in Form von alphanumerischen Zeichen, Symbolen, Bildern, Videos oder Animationen dargestellt werden.

Eine intuitive Informationsbereitstellung bedeutet ebenfalls, dass zu einem entsprechenden Zeitpunkt aus der Vielzahl an verfügbaren Informationen nur die für die Bearbeitung einer einzelnen Position erforderlichen Informationen bereitgestellt werden und nicht wie z.B. bei einer Kommissionierliste die Gesamtheit der verfügbaren Auftragsinformationen dauerhaft bereitgestellt wird.

Zudem sollen die Nutzer eine Einlernphase in Form eines exemplarischen Kommissioniervorgangs durchlaufen. Auf Basis dieser sollen sie das System dann so verstehen, dass sie es zukünftig allein nutzen bzw. korrekt bedienen können.

---

<sup>15</sup> Ein intuitives Verständnis setzt in diesem Kontext voraus, dass Informationen adäquat an das natürliche Verhalten der Mitarbeiter angepasst oder unmittelbar verständlich dargestellt werden (vgl. Schlick et al. 2010).



### ***Kontextsensitive und visuelle Informationsbereitstellung***

Die für den Kommissionierprozess erforderlichen Informationen sollen unmittelbar und situationsbezogen im Arbeitsbereich bzw. am jeweiligen Zielort des Geschehens (in situ) visualisiert werden.

Über 80 % der Informationen, die ein Mensch aufnimmt, werden über den optischen Sinneskanal erfasst (vgl. Weineck 2010; Schenk und Rigoll 2010). Es ist folglich davon auszugehen, dass die visuelle Informationsdarstellung nicht nur eine einfache und leicht verständliche Möglichkeit der Informationsvermittlung darstellt, sondern dass sie auch eine einfache und fehlerfreie Informationsaufnahme und -verarbeitung gewährleistet (siehe Kap. 2.2.2). Im Kontext der Kommissionierung wirkt eine optische Kommissioniererführung deshalb präventiv gegen Fehlgriffe in falsche Lagerfächer (vgl. Rammelmeier et al. 2012).

Zusätzlich bietet die visuelle Informationsbereitstellung eine hohe Flexibilität in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Darstellungsformen (Zeichen, Symbole, Bilder, Videos), die daraus eingesetzten Kombinationen, den Farbton, die Darstellungsgröße sowie den Darstellungsort.

### **5.2.3 Anforderungen an die Kontrollfunktion**

Nachfolgend genannte Anforderungen bzgl. der Qualitätssicherungsfunktion sind von großer Bedeutung und sollen im Entwicklungsprozess beachtet werden.

#### ***Automatische Kontrolle des Entnahme- und Ablageortes***

Die Entnahme- und Ablageprozesse der einzelnen Kommissionierpositionen müssen prozessparallel auf korrekte Ausführung überprüft werden. Hierdurch sollen Kommissionierfehler frühzeitig entdeckt und unmittelbar Hinweise zur Fehlerbehebung gegeben werden. Diese Vorgehensweise soll zum einen die Kommissionierfehlerrate reduzieren und zum anderen die Einhaltung einer gleichbleibend hohen Prozessqualität sicherstellen. Die Kontrolle der einzelnen Prozessschritte soll über einen automatischen Prüfmechanismus erfolgen, so dass von den Mitarbeitern keine zusätzliche manuelle Betätigung erforderlich ist. Diese automatische Kontrolle soll im „Hintergrund“ erfolgen, ohne dass sie von den Mitarbeitern bewusst wahrgenommen wird bzw. zu Verzögerungen bei der Kommissioniertätigkeit führen kann. Für eine möglichst effiziente Fehlervermeidung sollen bereits bei der Konzeption und Entwicklung des Assistenzsystems die vier Hauptmaßnahmen zur Fehlervermeidung innerhalb der Kommissionierung (Technik, Prozess, Organisation und Motivation) berücksichtigt werden (vgl. Rammelmeier et al. 2012). Im vorliegenden Anwendungsfall finden jedoch hauptsächlich die technischen Maßnahmen und die fehlerreduzierende Prozessgestaltung ihre Anwendung. Die organisatorischen Maßnahmen und die Sensibilisierung der Mitarbeiter sind vor allem im Zuge der Vorbereitung und Durchführung der Evaluierung von Relevanz (siehe Kap. 8).

#### ***Automatische Kontrolle der Menge und Identität***

Für die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Kommissionierqualität ist es erforderlich, neben der Kontrolle der Entnahme- und Ablageorte auch die entsprechende Menge und Identität der entnommenen Artikel zu kontrollieren. Die grundlegende Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz eines Assistenzsystems für Kommissionierprozesse ist, dass sich die richtigen Artikel in der richtigen Menge im richtigen Zustand zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort im Materialbereitstellungslager befinden. Es muss zwar davon ausgegangen werden, dass diese im WMS zu den jeweiligen Artikeln hinterlegten Informationen richtig und aktuell sind, trotzdem kann bei der Entnahme von einzelnen Artikeln (gegenüber der Entnahme von gesamten Behältern) nicht sichergestellt werden, dass diese auch in der korrekten Anzahl entnommen werden.

Gleichzeitig wird über eine Mengenkontrolle sichergestellt, dass der im WMS hinterlegte Lagerbestand um die entnommene Artikelanzahl reduziert wird und damit weiter aktuell bleibt. Dieser Prüfmechanismus der Mengen- und Identitätskontrolle soll automatisch und möglichst ohne Mehraufwand durch zusätzliche Handhabungsvorgänge erfolgen.

Die systemseitige Rückmeldung eines korrekt ausgeführten Entnahme- und Ablagevorgangs inkl. korrekter Menge und Identität einer Auftragsposition soll gleichzeitig als Voraussetzung für die Informationsbereitstellung der nachfolgenden Auftragsposition dienen und dadurch z.B. den klassischen Quittiertaster bei Pick-by-Light ersetzen bzw. den Übergang zum nächsten Prozessschritt unabhängig von einer Eingabe des Nutzers einleiten.

### **5.3 Anforderungsprofil von Seiten der Technik**

Neben den bereits beschriebenen prozess- und nutzerseitigen Anforderungen werden nachfolgend technische Anforderungen an die Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für manuelle Kommissioniertätigkeiten aus Sicht der Arbeitsmittel konkretisiert. Dieses Anforderungsprofil basiert auf dem im Kapitel 4.1 analysierten aktuellen Kommissionierprozess sowie auf den ermittelten Bedürfnissen der Nutzer (siehe Kap. 4.2) und unterteilt sich in Anforderungen an die Hard- und Software.

#### **5.3.1 Hardwareanforderungen**

Für den erfolgreichen und zuverlässigen Einsatz des zu entwickelnden Assistenzsystems sollten die nachfolgenden Anforderungen von Seiten der Hardware erfüllt werden.

##### ***Integration der vorhandenen Hardware***

*Das zu entwickelnde Assistenzsystem soll zum einen die derzeit vorhandene Infrastruktur der WfbM bestehend aus einem Durchlaufregallager<sup>16</sup> als Lagermittel (siehe*

Abbildung 28) und zum anderen den bereits entwickelten Typ eines Kommissionierwagens als Fördermittel integrieren. Dieser Kommissionierwagen wurde als Komponente eines Materialflusskonzeptes nach einem Wechselwagenprinzip entwickelt, in dem der Kommissionierwagen im Anschluss an den Kommissionierprozess in den Aufbau eines Montagearbeitsplatzes integriert bzw. „angedockt“ werden kann (siehe Abbildung 31). Der bestückte und „angedockte“ Kommissionierwagen dient dann als standardisierte Ausgangslage für den Einsatz eines Assistenzsystems zur Anleitung und Kontrolle der Montagetätigkeiten, das jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet wird. Zudem bietet der Kommissionierwagen über seine Höhenverstellbarkeit (mittels integrierter elektromechanischer Hubsäulen) ergonomische Vorteile für Kommissionierer mit unterschiedlichen Körpergrößen und leistet damit einen Beitrag zur Erfüllung des nutzerseitigen Anforderungskriteriums einer „ergonomischen Gestaltung“ (siehe Kap. 5.2). Diese Höhenverstellbarkeit soll auch während der Kommissionierung genutzt werden können. Dies bedeutet, dass das Assistenzsystem eine Anleitung und Kontrolle auch bei unterschiedlich eingestellten Höhen des Kommissionierwagens prozesssicher gewährleisten muss.

---

<sup>16</sup> Das schwerkraftbetriebene Durchlaufregallager gehört zu den gängigsten bzw. am häufigsten in der Industrie eingesetzten dynamischen Lagermitteln, welches insbesondere in der PzW-Kommissionierung seine Anwendung findet (vgl. Hompel et al. 2011).

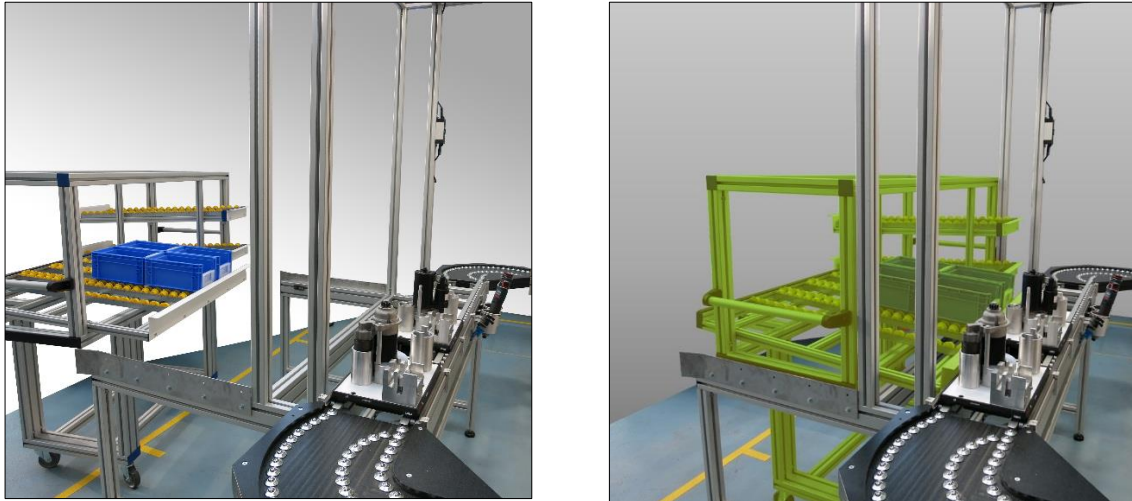


Abbildung 31: Materialflusskonzept mittels Wechselwagen: Kommissionierwagen in abgedocktem Zustand (links), Kommissionierwagen in angedockten Zustand (rechts)

### ***Flexibilität und Kompatibilität für verschiedene Artikelspektren bzw. Kommissionierwagen***

Um ein universales Artikelspektrum kommissionieren zu können, ist Kompatibilität und Flexibilität für die Nutzung bzw. den Einsatz des Assistenzsystems bei unterschiedlich großen Kommissionierwagen wichtig. Bedingt durch die unterschiedlichen Abmessungen der zu kommissionierenden Artikel werden auch die Kommissionierwagen in ihrer Bauform (Breite und Höhe) und Anzahl der Lagerebenen angepasst. Trotz dieser unterschiedlichen Ausführungen der Kommissionierwagen soll eine prozesssichere Anleitung und Kontrolle durch das Assistenzsystem gewährleistet werden können.

### ***Erweiterbarkeit bei Vergrößerung der Lagerkapazitäten und des Durchsatzes***

Das Assistenzsystem soll mit seinen Hardwarekomponenten so gestaltet sein, dass es bei einer Erweiterung der Lagerkapazität durch zusätzliche Durchlaufregaleinheiten oder bei einem steigenden Auftragsvolumen bzw. Warendurchsatz mittels einer vergrößerten Anzahl an Kommissionierwagen ohne großen Aufwand angepasst werden kann. Somit soll eine größtmögliche Flexibilität auch für zukünftige Veränderungen oder Anpassungen in Bezug auf eine Erweiterung der Kapazitäten sichergestellt werden.

### ***Unterstützung beim Verschieben des Kommissionierwagens***

In der empirischen Untersuchung zu den Nutzerfähigkeiten und -bedürfnissen (siehe Kap. 4.2.2) wurde von Seiten des Fachpersonals mehrfach der Vorschlag geäußert, das Verschieben des Kommissionierwagens während der Kommissionierung zu unterstützen bzw. dem Kommissionierwagen eine „Führung“ zu geben. Durch eine solche geführte Fortbewegung des Kommissionierwagens soll den Mitarbeitern der Kommissionierprozess erleichtert bzw. es ihnen ermöglicht werden, sich auf die wesentlichen Kommissioniervorgänge des Greifens und Ablegens zu konzentrieren. Zudem ist für die Kommissionierung innerhalb eines Lagergangs eine einachsige Verschiebbarkeit parallel zu den Lagerreihen ausreichend. Eine konstante Distanz zum Regal bzw. Entnahmeort mittels einer Führung könnte somit die Wegzeiten reduzieren. Zusätzlich können auch Menschen mit körperlicher Behinderung wie z.B. einer spastischen Lähmung eines Armes durch eine solche Führung einen Kommissionierprozess eigenständig durchführen.

### ***Schutz der Gesundheit und Sicherheit***

Die Gestaltung des Assistenzsystems mit seinen technischen Bestandteilen muss so ausgeführt werden, dass die aktuell gültigen Vorgaben des Arbeits- und Gesundheitsschutzes sowie der Arbeitssicherheit zur Vermeidung von Gefahrenstellen an Maschinen eingehalten werden (vgl. DIN EN ISO 12100). Dabei soll die arbeitsbedingte Gefährdungsprävention der Nutzer sowohl den Schutz der physischen als auch der psychischen Gesundheit umfassen. Hierfür ist es wichtig, dass die Anbringung der Hardwarekomponenten und die Umsetzung des Gesamtsystems so gestaltet ist, dass bei der Bedienung und Nutzung des Systems keine Verletzungsgefahr z.B. durch einen Stromschlag bei elektrischen Bauteilen oder durch Quetschung bei beweglichen Komponenten besteht. Zusätzlich muss auch die Gestaltung des Bedien- und Anleitungssystems so ausgeführt sein, dass weder eine Unter- noch eine Überforderung der Nutzer eintreten kann. Auch akustische und visuelle Störfaktoren der Arbeitsumgebung wie z.B. Umgebungsgeräusche, Sonneneinstrahlung etc. müssen vor der Implementierung des Assistenzsystems untersucht werden, um bei späterer Nutzung eine bestmögliche Abschirmung zu erreichen.

### **5.3.2 Softwareanforderungen**

Bei ganzheitlicher Betrachtung der technischen Anforderungen stellen neben den genannten Hardwareanforderungen auch die nachfolgenden softwareseitigen Kriterien eine wichtige Voraussetzung für einen zuverlässigen Einsatz mit hoher Nutzerakzeptanz dar.

#### ***Daten- bzw. softwareseitige Schnittstellengestaltung***

Das zu entwickelnde Kommissionierassistenzsystem ist ein Bestandteil des innerbetrieblichen Materialflusssystems der Produktionslogistik (siehe Kap. 4.1.2). Aus diesem Grund gibt es sowohl hardware- als auch ggf. softwareseitige Schnittstellen zu den vor- und nachgelagerten Funktionsbereichen, aber auch zu einem übergeordneten WMS bzw. Enterprise-Resource-Planning-System (ERP). Eine organisatorische und informatorische Verknüpfung und Kompatibilität mit diesen Bereichen und Schnittstellen ist zwingend erforderlich, um einerseits die Bereitstellung der erforderlichen Informationen sowie die Versorgung des Nachschubs im Kommissioniersystem sicherzustellen. Andererseits soll dadurch die Zusammenführung der kommissionierten Artikel mit den nachgelagerten Montageprozessen am richtigen Ort, in der vorgegebenen Zeit, mit der erwarteten Qualität und damit auch im kalkulierten Kostenrahmen sichergestellt werden.

#### ***Ergonomische Grundsätze der Dialoggestaltung***

Die arbeitswissenschaftlichen Grundsätze für die Dialoggestaltung zwischen den Nutzern und dem Assistenzsystem (im Speziellen der Anleitung und der Fehlerrückmeldung innerhalb der Kommissionierung) bilden die Leitlinien für eine ergonomische Mensch-System-Interaktion. Diese Rahmenbedingungen gliedern sich basierend auf der Norm DIN EN ISO 9241-110 in die Aufgabenangemessenheit, die Selbstbeschreibungsfähigkeit, die Steuerbarkeit, die Erwartungskonformität, die Fehlerrobustheit, die Individualisierbarkeit und die Lernförderlichkeit (vgl. DIN EN ISO 9241-110).

Zusammen mit dem semiotischen Interaktionsmodell der Mensch-Rechner-Interaktion nach Morris und den darin enthaltenen vier Abstraktionsebenen der pragmatischen, semantischen, syntaktischen und physikalischen Ebene ergibt sich für die sieben Gestaltungsgrundsätze eine differenzierte Darstellung (siehe Abbildung 32), welche als Basis für die Entwicklung des Bedien- und vor allem des Anleitungssystems (siehe Kap. 6.5) dient (vgl. Morris 1946).

Ebenen des semiotischen Systems	Gestaltungsgrundsätze						
	Aufgabenangemessenheit	Selbstbeschreibungsfähigkeit	Steuerbarkeit	Erwartungskonformität	Fehlerrobustheit	Individualisierbarkeit	Lernförderlichkeit
<b>Pragmatische Ebene (Modelle und Konzepte)</b>	Genereller Bezug zur Arbeitsaufgabe	Informationen über Modelleigenschaften	Definition eigener Modelle	Übereinstimmung des rechnerinternen mit dem mentalen Modell	Änderung von Modelleigenschaften	Anpassung an individuelle Eigenschaften der Benutzer	Generierbarkeit eigener Ordnungskriterien und Merkmale
<b>Semantische Ebene (Funktionen und Objekte)</b>	Ausführung von Funktionen dient der Zielerreichung	Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Funktionen	Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Funktionen	Funktionen in Analogie zu bisherigen Tätigkeiten	Reversibilität der fehlerhaften Ausführung einer Funktion	Individuelle Bezeichnung von Funktionen und Objekten	Unterstützung unterschiedlicher Lernstrategien
<b>Syntaktische Ebene (Dialogstruktur)</b>	Befehlsbezeichnung in Aufgabenvokabular	Befehlsbezeichnung verdeutlicht Funktion	Wahl zwischen Menüsteuerung oder Kommando-eingabe	Gleiche Bezeichnung gleicher Parameter	Vertauschen der Eingabereihenfolge von Parametern möglich	Präferenzen in der Auswahl von Dialogtechniken	Wiederauffrischen von Gelerntem ermöglichen
<b>Physikalische Ebene (Dateneingabe und -ausgabe)</b>	Art/ Form der Ein-/ Ausgabe ist der Aufgabe angepaßt	Verständliche Tastenbezeichnung	Wahl zwischen Maus- oder Tabletteingabe	Einheitliche Tastenbelegung	Einfache Änderung von Tippfehlern	Modifizierbare Tastenbelegung	Verdeutlichung von Lern- vs. Aufgabeninhalten

Abbildung 32: Die sieben Grundsätze der Dialoggestaltung kombiniert mit dem semiotischen Modell (vgl. Schlick et al. 2010)

## 5.4 Zielsetzungen für ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für leistungsgeminderte Mitarbeiter bei manuellen Kommissioniertätigkeiten

Auf Basis der im vorhergehenden Kapitel ermittelten Anforderungen werden in einem interdisziplinären Austausch (siehe Kap. 5.2) folgende Ziele für das zu entwickelnde Assistenzsystem zusammengefasst:

Das zu entwickelnde informationstechnische und kognitive Assistenzsystem soll

- zur Anleitung und Unterstützung von leistungsgeminderten und normal leistungsfähigen Mitarbeitern in manuellen Kommissionierprozessen, unabhängig vom Erfahrungs- und Leistungsgrad,
- zur Weiterentwicklung der individuellen Fertigkeiten und Fähigkeiten im Rahmen der auszuübenden Kommissioniertätigkeit,
- zur Verringerung der kognitiven Beanspruchung und des Stresslevels der Mitarbeiter während der Arbeitstätigkeit,
- zur Vorbeugung gegen verschleißbedingte Erkrankungen und zur Unterstützung eines gesunden Arbeitsverhaltens durch Einbeziehung ergonomischer und motivierender Elemente,
- zur Unterstützung und Förderung der Inklusion, Selbstbestimmung und Teilhabe an Arbeit bzw. Wiedereingliederung im Hinblick auf das industrielle Arbeitsleben von leistungsgeminderten Menschen,
- zur Verbesserung bzw. zum Erhalt der Motivation und Arbeitsfähigkeit,
- zur Reduzierung der Komplexität und des Aufwands bei der Einarbeitung und Betreuung von Mitarbeitern mit unterschiedlichem Leistungsniveau und fachlichem Hintergrund,
- zur Erhöhung der Flexibilität für den Einsatz von Mitarbeitern mit unterschiedlichen Leistungsniveaus bzw. bei der Auswahl der Kommissionierstrategie sowie
- zur Vermeidung von Kommissionierfehlern und zur Reduzierung von Prozesszeiten bei der Kommissionierung

dienen.

## 6 Konzeption und Entwicklung eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für Kommissionierprozesse

In den vorhergehenden Kapiteln wurde aufgezeigt, dass die verfügbaren und in der Industrie eingesetzten Anleitungs- und Assistenzsysteme für Kommissionierprozesse, die Anforderungen für den Einsatz mit leistungsgeminderten Menschen nicht ausreichend erfüllen. Sie bieten keine ausreichende nutzer- und prozesseitige Flexibilität, keine intuitiv verständlichen Anleitungen und keine durchgängige Kontrolle und Rückmeldung von ausgeführten Prozessschritten (vgl. Wiesbeck 2013) (siehe Kap. 3.5). Deshalb werden in der dritten Phase der nutzerzentrierten Entwicklung (siehe Kap. 2.5) mit Hilfe der im vorhergehenden Kapitel ermittelten technischen und vor allem nutzerseitigen Anforderungen verschiedene hardwareseitige Konzepte eines Assistenzsystems für leistungsgeminderte Menschen in manuellen Kommissionierprozessen entwickelt, miteinander verglichen und anschließend das am besten geeignete ausgewählt. Im Anschluss daran erfolgt eine detaillierte Ausarbeitung mit Entwicklung und Konstruktion der best-bewerteten Variante. Abschließend wird die Konzeption, Entwicklung und Auswahl der zweiten wichtigen Komponente des Assistenzsystems, des softwareseitigen Anleitungssystems, näher erläutert.

### 6.1 Spezifikation des ausgewählten Kommissionierprozesses

Im Folgenden wird der vorliegende Anwendungsfall der manuellen PzW-Kommissionierung mit statischer Artikelbereitstellung näher spezifiziert. Die Entwicklung und exemplarische Umsetzung eines Assistenzsystems zur Unterstützung von Kommissionierprozessen soll dabei von einem Hardwareaufbau ausgehen, der aus zwei exemplarischen Einheiten eines Durchlaufregallagers des Herstellers BITO und Typs SDS (entsprechend dem derzeitigen Stand in der WfbM, siehe Kap. 4.1) und dem eigenentwickelten Kommissionierwagen (siehe Abbildung 33 und Kap. 5.3) besteht. Die Realisierung soll des Weiteren in einer Laborumgebung erfolgen und sich an den bestehenden Arbeits- und Prozessabläufen der PzW-Kommissionierung (siehe Kap. 2.1.4) orientieren. Der Ablauf für einen solchen Prozess gliedert sich in mindestens sieben Arbeitsschritte und wurde ebenfalls bereits in Kapitel 4.1 erläutert.

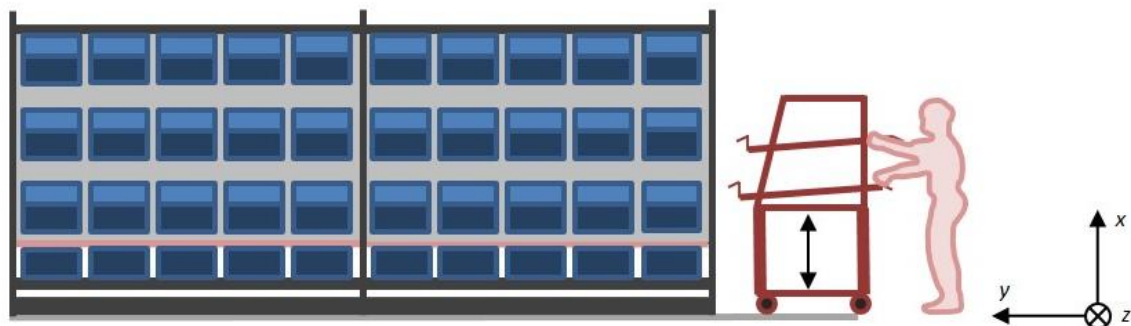


Abbildung 33: Durchlaufregallager und Kommissionierwagen

Als Planungsgrundlage für die weitere Entwicklung dienen die Hinweise der VDI-Richtlinie 3590 Blatt 1 und 2. Dort wird der iterative Prozess der Systemfindung in der Kommissionierung mittels der in Kapitel 2.1 beschriebenen Grundlagen, Kenndaten und des morphologischen Kastens (bezogen auf die drei Subsysteme: Informations-, Materialfluss- und Organisationssystem) erläutert (siehe Tabelle 3).

Die ersten drei Vorgänge eines Informationssystems, die **Auftragserfassung, -aufbereitung und -weitergabe**, gehören zu den administrativen Aktivitäten der Kommissionierung und haben deshalb keine besondere Bedeutung für die hardwareseitige Entwicklung und Auswahl der

Systemkomponenten des Assistenzsystems. Aus softwareseitiger Sicht sind jedoch Schnittstellen für eine elektronische und datenseitige Vernetzung der zukünftigen Steuerungs- und Bedienungssoftware des Assistenzsystems mit dem unternehmensinternen, aber auch lieferanten- und kundenseitigen Auftragsmanagement vorzusehen, um diese Elemente der Informationsverarbeitung automatisch und beleglos abzuwickeln.

Aufgrund der besonderen Situation müssen die Kommissionierer von administrativen Tätigkeiten und komplexen Entscheidungen so weit wie möglich entlastet werden.

Der Vorgang der **Quittierung** als Entnahme-Bestätigung des Kommissioniervorgangs stellt hingegen ein wesentliches Element der hardwareseitigen Entwicklung des Assistenzsystems dar. Laut der VDI-Richtlinie 3590 kann der Quittvorgang je Entnahmeeinheit, je Position oder für alle Positionen als manueller, halbautomatischer oder automatischer Prozess durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall soll die Quittierung für jede Entnahmeeinheit erfolgen und sowohl die Bestätigung als auch die Überprüfung eines Arbeitsschrittes darstellen. Dabei werden zwei verschiedene Typen von Entnahmeeinheiten (Gesamtbehälter und Einzelartikel) und drei Fälle der Quittierung als Kontrollfunktion (Entnahme, Abgabe und korrekte Stückzahl) unterschieden. Bei der Kommissionierung von Gesamtbehältern soll bei Entnahme- und Abgabeprozessen eine automatische Quittierung je Entnahmeeinheit erfolgen. Bei der Kommissionierung von Einzelartikeln soll zusätzlich eine automatische Überprüfung der korrekten Anzahl an kommissionierten Einzelartikeln stattfinden. Die detaillierten Kontroll- und Prüfinstrumente sind auf die besonderen Bedürfnisse und Anforderungen von leistungsgeminderten Menschen anzupassen.

Der Einsatz des Assistenzsystems soll Mitarbeiter unterstützen, von kognitiver Beanspruchung entlasten und möglichst keinen Mehraufwand im Arbeitsablauf durch die Bedienung und Handhabung von Systemkomponenten verursachen. Der **Transport der Güter zum Bereitstellungsort** ist nicht mehr Teil der vorliegenden Arbeit und wird deshalb nicht näher betrachtet.

Die **Materialbereitstellung** erfolgt beim vorliegenden Kommissionierprozess statisch, dezentral über mehrere Entnahmeorte und in ungeordneter Form über zwei Durchlaufregaleinheiten, die sich in einem Laborumfeld befinden und fest im Boden verankert sind. Die **Bewegung des Kommissionierers zum Bereitstellungsort** und der anschließende Transport der kommissionierten Güter zurück zum Abgabeort erfolgen zweidimensional zu Fuß. Die **Entnahme** (einzelne oder mehrere Teile pro Zugriff) aus dem Lager und das dezentrale und statische Ablegen in einen Sammelbehälter bzw. auf den Kommissionierwagen erfolgen hingegen manuell im dreidimensionalen Raum. Nach Beendigung des Kommissioniervorgangs wird der Kommissionierwagen mit den entnommenen und geordneten Gütern an einen zentralen **Abgabeort transportiert**. Dieser Übergabepunkt ist zugleich auch der Abholort für den Kommissionierwagen des nachfolgenden Auftrags. Da beim vorliegenden Kommissionierfall nur ganze Behälter (untere beide Entnahmeebenen) oder Einzelartikel (oberste Entnahmeebene) entnommen werden und diese durch verschiedene Ebenen räumlich voneinander getrennt sind, ist es nicht erforderlich, angebrochene **Ladeeinheiten zurückzuführen**.

Die **Aufteilung der Bereitstellungslager** in mehrere Zonen erfolgt abhängig von der Entnahmeeinheit (Gesamtbehälter oder Einzelartikel) und vom Artikelgewicht. Die Bereitstellung der Artikel für die Einzelteilentnahme erfolgt in der obersten Bereitstellungsebene. In den unteren beiden Ebenen hingegen werden alle Artikel für die Gesamtbehälterentnahme bereitgestellt. Die Zuordnung der Artikel in diese beiden Ebenen erfolgt anhand des Artikelgewichts. Die Abarbeitung der Kommissionieraufträge erfolgt nach der auftragsorientierten Kommissionierung, indem einzelne Aufträge nacheinander (sequenziell) abgearbeitet werden. Aufgrund des exemplarischen Auszugs eines Kommissionierlagers mit nur zwei Regaleinheiten wird die Betriebsorganisation mit der



Optimierung der Auftragssteuerung durch beispielsweise eine Optimierung der Wegzeiten oder des Personaleinsatzes im vorliegenden Anwendungsfall nicht näher betrachtet. Bei einem zukünftigen industriellen Einsatz könnte dies jedoch softwareseitig erfolgen (vgl. VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1).

Tabelle 3: Spezifizierung des zu entwickelnden Kommissioniersystems mit Hilfe eines morphologischen Kastens (vgl. VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1)

	Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten					
Informationssystem	Auftragserfassung	manuell		manuell/ automatisch		automatisch	
	Auftragsaufbereitung	Teilauftrag		Einzelauftrag		Auftragsgruppen	
		keine	manuell		manuell/ automatisch		automatisch
	Weitergabe	ohne Beleg		mit Beleg			
		Einzelposition		mehrere Positionen			
	Quittierung	je Entnahmeeinheit		je Position		alle Positionen	
manuell		manuell/ automatisch		automatisch			
Materialflusssystem	Transport der Güter zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt				
			eindimensional		zweidimensional		dreidimensional
			manuell		mechanisch		automatisch
	Bereitstellung	statisch	dynamisch				
			zentral		dezentral		ungeordnet
			geordnet				
	Bewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt				
			eindimensional		zweidimensional		dreidimensional
			manuell		mechanisch		automatisch
	Entnahme der Güter durch den Kommissionierer	manuell		manuell/ automatisch		automatisch	
		ein Teil pro Zugriff		mehrere Einzelteile je Zugriff			
	Transport der Güter zum Abgabeort	findet nicht statt	findet statt				
eindimensional			zweidimensional		dreidimensional		
manuell			mechanisch		automatisch		
Abgabe	statisch		dynamisch				
	zentral		dezentral				
	geordnet		ungeordnet				
Rücktransport der angebrochenen Ladeeinheiten	Findet nicht statt	findet statt					
		eindimensional		zweidimensional		dreidimensional	
		manuell		mechanisch		automatisch	
Organisations-system	Aufbauorganisation (Zonenaufteilung)	einzonig		mehrzonig			
	Ablauforganisation (Sammeln, Entnahme, Abgabe)	nacheinander		gleichzeitig			
		artikelorientiert		auftragsorientiert			
		artikelorientiert		auftragsorientiert			
	Betriebsorganisation (Auftragssteuerung)	ohne Optimierung		mit Optimierung			

Mit Hilfe der in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Anforderungen von Seiten des Arbeitsprozesses, der Technik (Hard- und Software) und des Nutzers wird ein Prozessablauf entwickelt, welcher exemplarisch ein Kommissionierszenario abbildet. Dieses soll es ermöglichen, sowohl den aktuell vorliegenden Kommissionierfall in der WfbM als auch die Kommissionierung in anderen Bereichen mit vergleichbaren Anforderungen zu unterstützen und zu ermöglichen. Eine weitere Analyse auf Basis des vorliegenden Kommissionieraufbaus und -ablaufs innerhalb der betrachteten



WfbM (siehe Kap. 2.1.4) sowie unter Zuhilfenahme der ausgewählten Spezifizierungen durch die VDI-Richtlinie 3590 ergibt für jeden einzelnen Kommissioniervorgang drei Kernprozesse:

1. Einen Entnahmeprozess, der sich aus Sicht der Hardware mehrheitlich auf das Durchlaufregallager konzentriert,
2. einen Prozess zur Überprüfung der korrekten Entnahmemenge und Identität der Artikel, der voraussetzt, dass hierfür ein zusätzliches Hardwaremodul wie z.B. ein Identsystem eingesetzt wird, und
3. einen Ablageprozess, der sich hardwareseitig hauptsächlich auf den Kommissionierwagen beschränkt (siehe Abbildung 34).

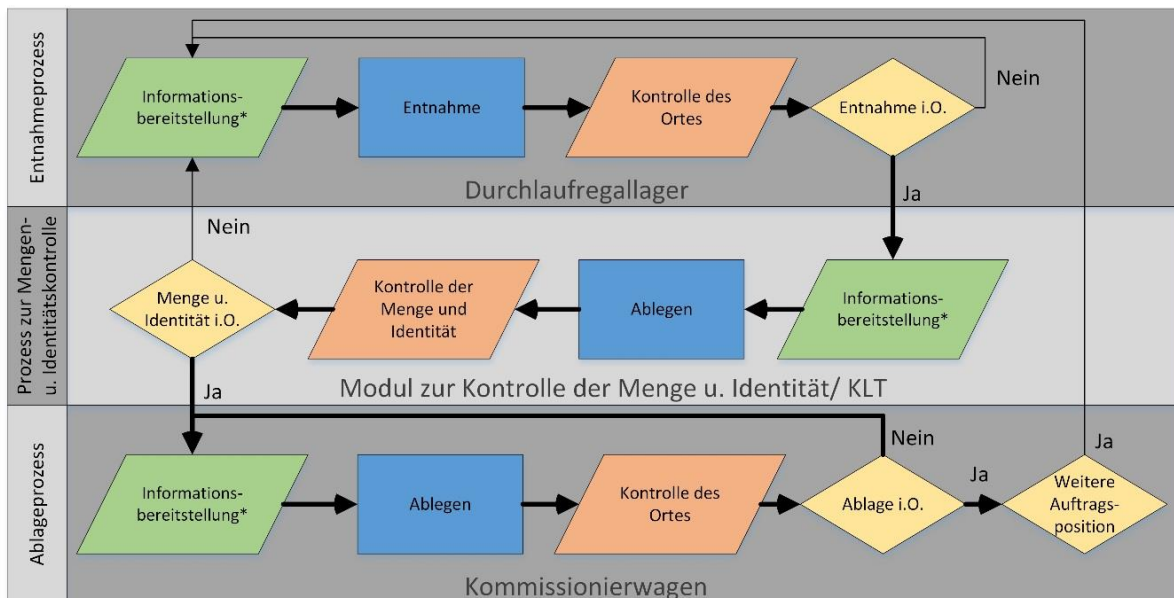
Allen drei Kernprozessen ist gemeinsam, dass für eine prozesssichere Abwicklung der Kommissionierschritte jeweils eine Informationsbereitstellung, eine Kontrolle und eine Situationsanalyse (gelbe Rauten in Abbildung 34) der einzelnen Tätigkeiten erfolgen muss (siehe auch Abbildung 16).

Die Informationsbereitstellung des Entnahmeprozesses beinhaltet die Navigation zum Entnahmeort (Fortbewegung in Richtung der y-Achse) (siehe Abbildung 33), die Lokalisierung der Entnahmeposition im Durchlaufregallager (greifen in Richtung der x- und z-Achse), die Mitteilung der Entnahmemenge, die Darstellung der Teileart bei der Einzelteilentnahme, die Lokalisierung des Ablageortes für die Mengen- und Identitätskontrolle und schließlich die Lokalisierung des Ablageortes auf dem Kommissionierwagen.

Die Kontrollfunktionen lassen sich anhand des durchgeführten Prozessablaufes in drei Hauptmerkmale unterteilen:

Als erstes in ein Kontrollmerkmal zur Überprüfung der Entnahme am korrekten Entnahmeort (Überprüfung der y- und z-Koordinate). Als zweites muss nach Sicherstellung des korrekten Entnahmeortes die korrekte Entnahmemenge und Identität der Artikel überprüft werden. Mit einem dritten Kontrollmerkmal wird abschließend der korrekte Ablageort sichergestellt.

Hieraus ergeben sich drei Kontrollvariablen: Ort, Menge und Identität.



\* „Informationsbereitstellung“ beinhaltet die Bereitstellung von Informationen

- zur Navigation zum Entnahmeort (Fortbewegung in y-Achse) sowie zur Lokalisierung der Entnahmeposition im Durchlaufregallager (Greifen in z-Achse),
- zur Anleitung der Entnahmemenge sowie zur Darstellung der Teileart bei der Einzelteilentnahme und
- zur Lokalisierung des Ablageortes für die Mengen- und Identitätskontrolle sowie zur Lokalisierung des Ablageortes auf dem Kommissionierwagen.

Abbildung 34: Betrachteter Kommissioniervorgang mit drei Kernprozessen

Die beschriebene Einteilung in die drei Kernprozesse beschränkt sich auf einen Einzelauftrag und setzt voraus, dass der Weg zwischen dem Abholort des Kommissionierwagens und der Startposition am Durchlaufregal sowie der Weg zum Abgabeort nach Beendigung des Kommissionierprozesses ohne Unterstützung zurückgelegt werden kann.

Das in der vorliegenden Arbeit betrachtete Kommissionierszenario beschränkt sich somit auf die Kommissionierung, beginnend mit einer Startposition am Durchlaufregallager und endend mit der letzten korrekt kommissionierten Position eines Auftrags. Zusätzlich wird für die Entwicklung und einen etwaigen späteren Einsatz davon ausgegangen, dass die Bestückung der Durchlaufregale und die damit zusammenhängende Dateneingabe in das WMS ohne Fehler erfolgen. Zur Sicherstellung der Funktion eines Assistenzsystems müssen alle eingelagerten Artikel in der richtigen Menge, am richtigen Lagerort, in der richtigen Qualität und mit den richtigen Artikelkenndaten (Gewicht, Abbildung etc.) im WMS hinterlegt sein.

Ausgehend von den vorliegenden Spezifizierungen und Einteilungen sowie unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 ermittelten Anforderungen wird das zu entwickelnde Assistenzsystem für Kommissionierprozesse, insbesondere in den Bereichen der Informationsbereitstellung und der Kontrolle, in den nachfolgenden Kapiteln detailliert dargestellt.

## **6.2 Entwicklung und Auswahl der Funktionseinheiten des Assistenzsystems**

Die Ausgangsbasis für die Entwicklung von verschiedenen Konzepten eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für Kommissionierprozesse bilden zum einen die in Kapitel 4 vorgestellte Analyse mit den daraus abgeleiteten prozess- und nutzerseitigen sowie technischen Anforderungsprofilen aus Kapitel 5 und zum anderen die auf Basis der VDI-Richtlinie 3590 ermittelten Spezifizierungen mit dem daraus hervorgegangenen Prozessablauf eines exemplarischen Kommissionierszenarios, wie im vorhergehenden Kapitel dargestellt. Diese Vorgehensweise soll es ermöglichen, mit dem entwickelten Assistenzsystem das vorliegende Kommissionierszenario primär in der WfbM, aber auch die Kommissionierung in anderen Bereichen und unter vergleichbaren Anforderungen, zu unterstützen. Für die weitere Entwicklung und exemplarische Umsetzung des Assistenzsystems werden nachfolgend verschiedene Funktionseinheiten für die Informationsbereitstellung, die Entnahme- und Ablagekontrolle sowie die Stückzahlüberwachung näher spezifiziert und für jede Einheit konkrete physische Komponenten ausgewählt.

### **6.2.1 Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur visuellen Informationsbereitstellung**

Wie bereits in Kapitel 2.5 dargestellt, gibt es verschiedene Möglichkeiten und Darstellungsmedien, um dem Kommissionierer die erforderlichen Anweisungen und Informationen für beispielsweise den Entnahmeort, die -menge oder den Ablageort bereitzustellen.

Eine Gegenüberstellung der derzeit auf dem Markt verfügbaren Kommissioniertechnologien (siehe Kap. 3.3) hat ergeben, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen (PzW-Kommissionierung mit normal leistungsfähigen Mitarbeitern und zusätzlicher Prozesskontrolle) vor allem die neuartigen Ansätze Pick-by-Beamer (siehe Kap. 3.2.2) und -Vision (siehe Kap. 3.2.4) geeignet erscheinen (siehe Kap. 3.3).

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 dargestellten Anforderungen an ein nutzerzentriertes Assistenzsystem für leistungsgeminderte Nutzer bietet das verfügbare System Pick-by-Beamer, bei dem starre optische LED-Lichtquellen verwendet werden, jedoch wenig Flexibilität bei der Gestaltung der Kommissionieranleitungen. Für jede Ebene eines Durchlaufregallagers wird ein eigenes LED-Lichtelement benötigt, welches nur farbliche Varianz, aber keine zusätzlichen Darstellungsformen für projizierte Anleitungen ermöglicht wie z.B. verschiedene geometrische Formen, Texte, Bilder etc.

Eine Anleitung mit Pick-by-Vision bzw. mit einem HMD bietet zwar diese Flexibilität, erfordert jedoch eine höhere kognitive Leistungsfähigkeit und birgt zusätzlich das Risiko einer erhöhten mentalen Beanspruchung der Nutzer, was bei der vorliegenden Zielgruppe nicht vertretbar wäre (siehe Kap. 3.2.4). Aus diesen Gründen sind die derzeit auf dem Markt verfügbaren Arten der Informationsbereitstellung in der manuellen Kommissionierung für den vorliegenden Anwendungsfall nicht geeignet.

Die Anleitung des zu entwickelnden Assistenzsystems für Kommissionierprozesse wird daher mit der bewährten Lösung eines auf projizierten Lichtsignalen basierenden AR-Systems für leistungsgeminderte Mitarbeiter aus dem Montagebereich<sup>17</sup> (vgl. Hörz et al. 2013) dargestellt und über handelsübliche Projektoren umgesetzt. Diese Lösung erfüllt das Anforderungskriterium der visuellen Informationsbereitstellung und bietet zugleich einen hohen Grad an Flexibilität, bezogen auf die informatorische Gestaltung (z.B. durch Texte, Bilder, Videos) und Reichhaltigkeit (z.B. durch Kombination der Informationselemente) der Anleitung.

Aufgrund der Varianz der Fähigkeiten im Bereich der kognitiven Wahrnehmung und Leistung der zukünftigen Nutzergruppe wird großer Wert auf eine intuitive, flexible und nutzerzentrierte Gestaltung der Informationsbereitstellung gelegt. Diese Aspekte spiegeln sich in den beiden Anforderungskriterien einer intuitiven sowie bedarfsgerechten und adaptiven Informationsbereitstellung wider, wobei deren Umsetzung bzw. Erfüllung durch die ausgewählte Lösung ermöglicht wird. Zudem bietet eine Informationsbereitstellung per Projektion das Potenzial, alle anzuleitenden Tätigkeiten, angefangen von der Navigation zum Entnahmeort bis hin zur Lokalisierung des Ablageortes auf dem Kommissionierwagen, samt den jeweils erforderlichen Informationen mit nur einer Art von Funktionseinheit umzusetzen. Auch die negativen Beeinträchtigungen, welche bei der Nutzung von Datenbrillen auftreten können, werden durch die Nutzung eines Projektor-Systems vermieden (siehe Kap. 3.2).

Bei der Nutzung von Projektoren als Darstellungsmedium gibt es jedoch wichtige Voraussetzungen und Rahmenbedingungen zu beachten. Dazu gehört unter anderem das Vorhandensein einer geeigneten physikalischen Oberfläche zur Projektion. Im industriellen Einsatz ergibt sich meist eine Limitierung der Größe der Projektionsfläche und dadurch der Darstellungsqualität bzw. Erkennbarkeit der anzuzeigenden Informationen. Des Weiteren ist die Projektion von den Lichtverhältnissen der Umgebung (wie z.B. Sonneneinstrahlung, Deckenbeleuchtungen etc.) abhängig, was ebenfalls zu Problemen bei der Erkennbarkeit führen kann, wenn keine ausreichende Abschirmung gewährleistet wird. Je nach Qualität und Material der Projektionsoberfläche und Lichtstärke des Projektors wirken sich die Lichtverhältnisse mehr oder weniger stark auf die Darstellungsqualität und Erkennbarkeit aus. Zudem müssen für die meisten Projektoren die Projektionsflächen orthogonal zur Mittelachse des Projektionskegels angebracht sein. Andernfalls können je nach Winkelabweichung zwischen Projektor und Projektionsoberfläche Verzerrungen auftreten, die



Abbildung 35: Ausgewählte Funktionseinheit zur Informationsbereitstellung: Projektor: Optoma W 306 ST

---

<sup>17</sup> Es wurde bereits in verschiedenen Studien gezeigt, dass insbesondere Mitarbeiter mit kognitiver Einschränkung im Bereich der Montage und Konfektionierung von diesem Montageassistenzsystem profitieren können (vgl. Bächler et al. 2015b; Funk et al. 2015; Korn 2014).

entweder hardwareseitig z.B. über die Anbringung eines Spiegels oder softwareseitig z.B. über die Implementierung von mathematischen Algorithmen verhindert werden können (vgl. Schwerdtfeger et al. 2008).

Zur Sicherstellung eines möglichst geringen Abstands zwischen Projektor und den Projektionsflächen sowie zwecks bestmöglicher Lichtausbeute mit geringem Streulichtanteil wird statt des bisher im Montagebereich verwendeten Projektors „Casio XJ-A241“ ein Kurzdistanzprojektor eingesetzt. Eine Marktanalyse unter Berücksichtigung der Auswahlkriterien Projektionsverhältnis, Lichthelligkeit, Auflösung und Preis führt aufgrund des bestmöglichen Preis-Leistungs-Verhältnisses zur Auswahl eines Projektors des Herstellers Optoma mit der Bezeichnung W 306 ST (siehe Abbildung 35).

### **6.2.2 Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle von Entnahme- und Ablageprozessen**

Wie bereits in Kapitel 6.1 dargestellt, muss die Kontrollfunktion eines Assistenzsystems für den vorliegenden Anwendungsfall mindestens drei Merkmale pro Auftragsposition überprüfen. Das erste Kontrollmerkmal (Überprüfung des richtigen Entnahmeortes) beinhaltet dabei sowohl die Überprüfung der Anwesenheit vor der richtigen Regalreihe (x-Koordinate), als auch die Überprüfung der Entnahme aus dem richtigen Regalfach (y-Koordinate) sowie aus der richtigen Regalebene (z-Koordinate). Das zweite Kontrollmerkmal stellt sicher, dass die Artikel richtig identifiziert und in der richtigen Menge entnommen werden. Mit dem dritten Kontrollmerkmal wird abschließend der richtige Ablageort kontrolliert.

Für die Überprüfung der Kontrollvariablen des Ortes werden bei den derzeit auf dem Markt verfügbaren Kommissioniertechnologien verschiedene taktile und berührungslose Techniken eingesetzt. Die Entnahme- und Zugriffskontrolle kann dabei durch die Quittierung eines mechanischen Tasters (z.B. Pick-by-Light), durch einen manuellen optischen Scanvorgang eines Codes am Lagerfach bzw. Artikel oder durch die Spracheingabe einer Prüfziffer (z.B. Pick-by-Voice) erfolgen. Bei diesen stark vom Nutzer abhängigen Varianten der Kontrolle kann jedoch nicht sichergestellt werden, dass der Artikel dann auch tatsächlich an der richtigen Stelle und in der richtigen Menge entnommen sowie am richtigen Ort abgelegt wurde. Weitere gängige Systeme auf Basis von tragbaren Funk- (z.B. RFID) oder Ultraschalltechnologien können zwar die greifende Hand lokalisieren und damit den richtigen Entnahmeort sicherstellen, beeinträchtigen aber häufig die Bewegungsfähigkeit, sind störanfällig und meist auch sehr kostenintensiv.

Aus diesen Gründen soll die Entnahme- und Zugriffskontrolle im vorliegenden Fall mittels Überwachung der Regalfront durch ein optisches System umgesetzt werden. In der Praxis wird dieser Systemtyp in der Regel über ein optisches Lichtgitter oder einen Laser-Scanner realisiert.

Der Vorteil dieser optischen Technologien ist, dass für den Kommissionierer keine Beeinträchtigungen der körperlichen Bewegungs- und Sinnesfunktionen entstehen und die Verfügbarkeit beider Hände für die auszuführenden Tätigkeiten sichergestellt werden kann.

Aufgrund der nur sequenziellen Erfassung von Szenen, der hohen Störanfälligkeit und des hohen Installations- und Investitionsaufwands für Lichtgitter- oder Laser-Scanner-Lösungen soll für die



*Abbildung 36: Ausgewählte Funktionseinheit zur Kontrolle von Entnahme- und Ablageprozessen: Microsoft Kinect*

Überprüfung der Kontrollvariable des Ortes im vorliegenden Anwendungsfall ein optischer 3D-Sensor eingesetzt werden. Im Vergleich von verschiedenen Modellen und Anbietern stellt sich der Tiefensensor „Kinect“ des Herstellers Microsoft (siehe Abbildung 36) für den vorliegenden Anwendungsfall als die am besten geeignete Variante heraus. Dieser Tiefensensor basiert auf dem berührungslosen Oberflächenmessverfahren „Time-of-Flight“ und zeichnet sich vor allem durch eine hohe Genauigkeit und Auflösung mit einem konkurrenzlosen Preis-Leistungs-Verhältnis aus. Zudem bestehen für diesen Sensortyp bereits positive Erfahrungen im Montage-, Fertigungs- und Robotikbereich (vgl. Bächler et al. 2015b).

Das dritte Kontrollmerkmal des Ablageortes ist ähnlich zum ersten Kontrollmerkmal des Entnahmeortes und unterscheidet sich in den Grundzügen nicht vom Entnahmeprozess. Aus diesen Gründen wird für die Kontrolle eines Ablageprozesses dieselbe Funktionseinheit eingesetzt (Kinect-Sensor) wie für die Kontrolle des Entnahmeprozesses.

Das zweite Kontrollmerkmal, basierend auf der Überprüfung der Variablen „Menge“ und „Identität“ der entnommenen Artikel, lässt sich mit einem Tiefensensor nicht prozesssicher abbilden. Aus diesen Gründen muss für diese beiden Kontrollvariablen eine weitere Funktionseinheit eingesetzt werden, die nachfolgend näher erläutert wird.

### 6.2.3 Konzeption und Auswahl einer Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle der Menge und Identität

Für die Kontrolle der Menge und Identität von entnommenen Artikeln gibt es eine Vielzahl an Methoden und technischen Möglichkeiten. Häufig werden hierzu manuelle Verfahren verwendet, wie z.B. das manuelle Abzählen mit anschließendem Abhaken bzw. mehrmaligen Quittieren einer Kontrolltaste oder anschließender manueller Eingabe in ein mobiles Datenterminal. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von sogenannten Identsystemen zur Identifizierung der einzelnen Artikel. Hierbei haben sich vor allem Barcodescanner, welche häufig bereits in mobilen Datenterminals integriert sind, oder RFID-Lesegeräte als gängige Variante herausgestellt. Bei der Einzelteilentnahme wird dabei der gravierte



Abbildung 37: Ausgewählte Funktionseinheit zur Kontrolle der Menge und Identität: Bosche Zählwaage CS 60000

oder aufgeklebte Barcode bzw. RFID-Chip jeder einzelnen Entnahmeeinheit eingescannt bzw. gelesen. Diese Vorgehensweise erfordert auf jedem zu entnehmenden Artikel entsprechende Barcodes oder RFID-Chips. Vor allem bei der Kommissionierung von Kleinteilen und Schüttgütern kommen diese Verfahren an die Grenze der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Auch der zusätzlich erforderliche Arbeitsschritt des Aufbringens eines Identifizierungsmerkmals führt vor allem bei Kleinteilen zu steigenden Kosten und macht den Einsatz eines alternativen Verfahrens erforderlich. Hierfür bietet sich eine andere gängige Methode als ergänzende Kontrolleinheit zum bereits ausgewählten Tiefensensor an: Die Nutzung einer Waage.

Eine Waage hat den Vorteil, dass die Überprüfung der Menge selbst bei großen Stückzahlen einfach und schnell erfolgt und gleichzeitig die Identität der entnommenen Artikel kontrolliert werden kann. Weitere Vorteile sind, dass sich die Waage gut und kostengünstig in den üblichen Prozessablauf der Kommissionierung integrieren lässt (vgl. Rammelmeier et al. 2012). Im Anschluss an eine Nutzwertanalyse mit paarweisem Vergleich unter Einbeziehung verschiedener Anbieter und



Produktvarianten wurde die Zählwaage „CS 60000“ der Firma Bosche mit einer Teilung von 0,5 g ausgewählt (siehe Abbildung 37).

### 6.3 Entwicklung von Hardwarekonzepten und Auswahl der umzusetzenden Variante

Die drei ausgewählten Funktionseinheiten (Projektor, Tiefensensor, Waage) sowie die hardwareseitig bereits vorhandenen Komponenten eines Durchlaufregallagers und eines Kommissionierwagens (siehe Abbildung 33) bilden die Ausgangssituation für die weitere Entwicklung von verschiedenen Hardwarekonzepten eines Kommissioniersystems.

Im Folgenden werden nun drei verschiedene Hardwarekonzepte zur Realisierung eines Assistenzsystems für manuelle Kommissioniertätigkeiten ausgearbeitet und deren Vor- bzw. Nachteile aufgezeigt. Anschließend werden diese drei Konzepte bewertet und die am besten geeignete Variante ermittelt. Abschließend erfolgen die Simulation mit Hilfe eines CAD-Modells und ein Testaufbau in Laborumgebung, um die Anordnung und Befestigung der Funktionseinheiten detaillierter auszuarbeiten.

#### 6.3.1 Konzept 1: Systemlösung mit statischer Assistenzeinheit

Bei dieser Variante (Abk. statisch) werden ein Projektor und zwei Kinects statisch bzw. zentral in der Mitte der beiden Regaleinheiten positioniert. Die Befestigung der drei Einheiten könnte mit Hilfe eines Kragarms oder einer Deckenhalterung erfolgen (siehe Abbildung 38). Um sowohl die beiden Regaleinheiten als auch den Kommissionierwagen projektionstechnisch erreichen zu können, müsste der ausgewählte Projektor eine Befestigungshöhe von mindestens 3,7 m aufweisen. Aus dieser Höhe wäre eine Überwachung des gesamten Arbeitsbereiches auch mit einer Kinect möglich. Aufgrund der geringen Investitionskosten werden jedoch zur Erzielung einer höheren Auflösung bzw. Prozesssicherheit bei der Entnahme und Ablage zwei Kinects eingesetzt. Hierbei überwacht jede Kinect eine Regaleinheit und ggf. den Kommissionierwagen. Die Vor- und Nachteile der Systemlösung mit statischer Assistenzeinheit sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

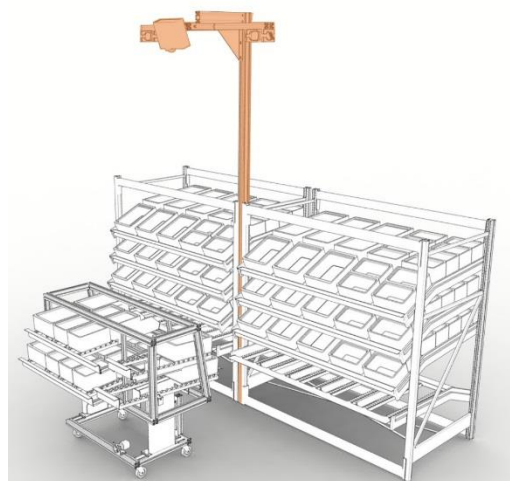


Abbildung 38: Konzept 1: Statische Assistenzeinheit

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der statischen Assistenzeinheit

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- gute Erweiterbarkeit: für zwei Durchlaufregaleinheiten werden jeweils ein Projektor und zwei Kinects benötigt</li> <li>- Kommissionierwagen bleibt flexibel beweglich bzw. unbeeinträchtigt durch die Assistenzeinheit</li> <li>- für vorliegenden Laboraufbau ist nur ein Projektor erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Investition bei vielen Regaleinheiten bzw. großen Lagern</li> <li>- Projektor muss großen Überwachungsbereich abdecken → Problematik des Schattenwurfs und Verdeckung durch Kommissionierer sowie Gefahr der Unschärfe nimmt zu</li> <li>- beim Einsatz von mehreren Assistenzeinheiten, jeweils bestehend aus einem Projektor und zwei Kinects, müssen</li> </ul>

	diese datentechnisch miteinander verknüpft sein, um einen „fließenden“ Übergang der Anleitung und Kontrolle bei Eintritt in einen neuen Überwachungsraum sicherzustellen
--	--

### 6.3.2 Konzept 2: Systemlösung mit einachsiger beweglicher Assistenzeinheit

Diese Variante (Abk. einachsiger) zeichnet sich dadurch aus, dass der Kommissionierwagen zu Beginn des Kommissionierprozesses fest mit einem Rahmen gekoppelt wird, welcher wiederum auf zwei Linearführungen verschiebbar mit den beiden Regaleinheiten verbunden ist. Bei diesem Konzept werden zwei Assistenzeinheiten mit je einem Projektor und einer Kinect eingesetzt. Die Assistenzeinheit, welche die Anleitung und Kontrolle regalseitig abdeckt, wird an der Oberseite des Rahmens befestigt. Die Assistenzeinheit für den Kommissionierwagen wird an einem Ausleger, der rechtwinklig zu den Regalen bzw. Linearführungen am Rahmen befestigt ist, angebracht (siehe Abbildung 39). Die beiden Assistenzeinheiten sind zwar beweglich, aber trotzdem fest mit den Regaleinheiten verbunden, wodurch eine statische Energie- und Datenversorgung z.B. mit Unterstützung einer Energieführungskette möglich ist. Aufgrund der mobilen Ausführung muss bei dieser Lösung zur Erfassung der aktuellen Position des Kommissionierwagens (Ist-Position) und zur Messung der Distanz zwischen diesem Bezugspunkt und dem Zielort (Soll-Position) beispielsweise ein Wegmesssystem eingesetzt werden.

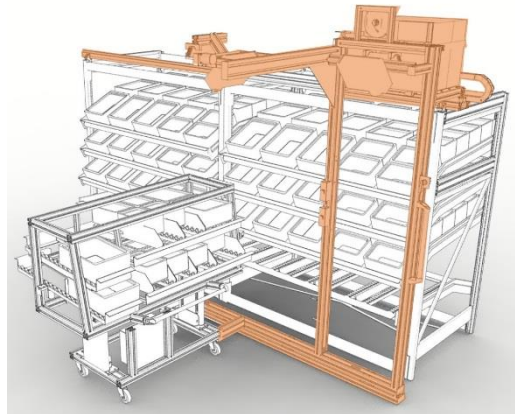


Abbildung 39: Konzept 2: Einachsige geführte Assistenzeinheit

Zusätzlich könnte diese Variante zur Unterstützung und Entlastung des Kommissionierers mit einem Linearantrieb nachgerüstet werden.

Die Vor- und Nachteile der Systemlösung mit einachsiger beweglicher Assistenzeinheit werden durch Tabelle 5 verdeutlicht.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der einachsigen geführten Assistenzeinheit

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- gute Erweiterbarkeit: durch die vorhandene Mobilität sind bei diesem Systemtyp die Durchlaufregallager theoretisch unbegrenzt verlängerbar</li> <li>- Kommissionierwagen bleibt unbeeinträchtigt durch die Assistenzeinheit: bei Nachrüsten eines Antriebs zusätzliche Entlastung des Kommissionierers</li> <li>- durch Einsatz von zwei getrennten Assistenzeinheiten werden Probleme des Schattenwurfs, der Verdeckung und der Unschärfe vermindert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- leicht erhöhter Kraftaufwand zum Verschieben des gekoppelten Kommissionierwagens durch zusätzliches Gewicht des Rahmenaufbaus und der Assistenzeinheiten</li> <li>- zusätzlicher Investitionsaufwand für Linearführungen, ein Wegmesssystem und eine zweite Assistenzeinheit</li> </ul>

### 6.3.3 Konzept 3: Systemlösung mit zweiachsig beweglicher Assistenzeinheit

Charakteristisch für die dritte Variante (Abk. zweiachsig) ist, dass zwei Assistenzeinheiten eingesetzt werden, die sich beide auf dem frei verschiebbaren Kommissionierwagen befinden. Hierfür muss der Kommissionierwagen mit einem zusätzlichen Aufbau mit Kragarm ausgestattet werden, um daran eine Assistenzeinheit zur Anleitung und Kontrolle für die Regalseite sowie eine Einheit zur Anleitung und Kontrolle für die Seite des Kommissionierwagens zu befestigen (siehe Abbildung 40). Da der Kommissionierwagen unabhängig von der zentralen Energie- und Datenversorgung ist, muss diese dezentral beispielsweise über Akkumulatoren sowie einen eigenen Rechner auf dem Kommissionierwagen sichergestellt werden. Aufgrund der freien Positionier- und Verschiebbarkeit des Kommissionierwagens wird ein zusätzliches optisches Trackingsystem zur genauen Erfassung der Position und Orientierung benötigt (vgl. Kammergruber und Günthner 2011). Damit soll dem Kommissionierer positionsgenau und perspektivisch korrekt die Anleitung am Regal projiziert und die positionsgenaue Kontrolle per Tiefensensor sichergestellt werden. Die Vor- und Nachteile dieser Systemlösung werden in Tabelle 6 dargestellt.



Abbildung 40: Konzept 3: Zweiachsige bewegliche Assistenzeinheit

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der mobilen Assistenzeinheit

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- gute Erweiterbarkeit: durch die vorhandene Mobilität sind auch bei diesem Systemtyp die Durchlaufregallager theoretisch unbegrenzt verlängerbar, evtl. muss jedoch das Positionserfassungssystem erweitert werden</li> <li>- freie Verschieb- und Positionierbarkeit des Kommissionierwagens in der Kommissionierumgebung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dadurch, dass sich die gesamte Systemtechnik auf dem Wagen befindet, wird dieser unhandlich und schwer bzw. der Kraftaufwand zum Verschieben erhöht sich</li> <li>- hoher zusätzlicher Investitionsaufwand für Akkumulatoren, ein Positionserfassungssystem, eine zweite Assistenzeinheit, einen zusätzlichen Rechner und den zusätzlichen Aufbau für jeden im Einsatz befindlichen Kommissionierwagen</li> <li>- Problematik des Schattenwurfs und Verdeckung durch Kommissionierer auf Regalseite aufgrund größerer Distanz zwischen Kommissionierwagen und Durchlaufregal</li> <li>- „Toter Winkel“ für Projektion und Kontrolle bei leichter Schrägstellung des Wagens</li> <li>- Wagen muss immer in unmittelbarer Nähe des Zielortes abgestellt werden, um Projektion zu ermöglichen</li> </ul>



#### 6.3.4 Bewertung der Hardwarekonzepte

Nach der Erarbeitung der drei Hardwarekonzepte erfolgt die vergleichende Bewertung zur Ermittlung der am besten geeigneten Variante in einer strukturierten Vorgehensweise.

Die Ermittlung der Bewertungskriterien und deren Gewichtung erfolgt mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs, in dem jedes Bewertungskriterium mit jedem anderen Bewertungskriterium verglichen wird. Die anschließende Bewertung der Konzepte erfolgt in einem Expertenteam (bestehend aus vier Mitgliedern mit technischem Hintergrund) auf Basis einer Nutzwertanalyse.

Gemeinsam wurden die folgenden fünf Bewertungskriterien erarbeitet und festgelegt, welche in Tabelle 7 mit der Abstufung von vier Erfüllungsgraden und der dazugehörigen Erläuterung dargestellt sind:

1. Realisierbarkeit
  - *Wie groß ist der hard- und softwareseitige Aufwand, um die Systemlösung mit den bereits bestehenden Komponenten des Durchlaufregallagers und des Kommissionierwagens sowie den vorhandenen Kompetenzen und Mitteln in der Laborumgebung zu realisieren?*
2. Prozesssicherheit
  - *Wie prozesssicher ist die Systemlösung, d.h. wie groß ist die Sicherheit, den Kommissionierprozess anhand der Anleitung und Kontrolle der einzelnen Prozessschritte fehlerfrei durchzuführen?*
  - *Zusätzlich wird mit diesem Kriterium die Gesamtsteifigkeit und das Schwingungsverhalten der Systemlösung bewertet, da eine schwingungsfreie Positionierung der beiden Komponenten eine elementare Voraussetzung für die wiederholgenaue und prozesssichere Messung mit der Kinect und Anleitung mit dem Projektor ist.*
3. Flexibilität
  - *Wie flexibel ist die Systemlösung bei schwankendem Auftragsvolumen, variierenden Kommissionieraufträgen in Bezug auf die Größe und den Typ der Kommissioniergüter sowie einer dadurch zunehmenden Größe und Anzahl der Kommissionierwagen?*
4. Ergonomie
  - *Wie gut passt sich die Systemlösung an den jeweiligen Kommissionierer an, um ein ergonomisch optimales Arbeiten zu ermöglichen, und wie groß ist der Kraftaufwand für das Mitbewegen des Kommissionierwagens?*
5. Erweiterbarkeit
  - *Wie groß ist der hard- und softwareseitige Aufwand, um die Systemlösung bei einer Verlängerung des Durchlaufregallagers ebenfalls zu erweitern?*

Tabelle 7: Bewertungskriterien mit Erfüllungsgrad und zugehöriger Erläuterung

Bewertungs-kriterium	Erfüllungs-grad	Erläuterung
Realisier-barkeit	3	Eine Realisierung ist mit geringem Aufwand möglich.
	2	Eine Realisierung ist mit mittlerem Aufwand möglich.
	1	Eine Realisierung ist nur mit großem Aufwand möglich.
	0	Eine Realisierung ist nur mit sehr großem Aufwand möglich.
Prozess-sicherheit	3	Die Systemlösung bietet eine sehr hohe Prozesssicherheit.
	2	Die Systemlösung bietet eine gute Prozesssicherheit.
	1	Die Systemlösung bietet eine gerade noch ausreichende Prozesssicherheit.
	0	Die Systemlösung bietet keine ausreichende Prozesssicherheit.
Flexibilität	3	Die Systemlösung bietet eine sehr hohe Flexibilität.
	2	Die Systemlösung bietet eine gute Flexibilität.
	1	Die Systemlösung bietet eine gerade noch ausreichende Flexibilität.
	0	Die Systemlösung bietet keine ausreichende Flexibilität.
Ergonomie	3	Sehr gute ergonomische Gestaltung der Systemlösung.
	2	Gute ergonomische Gestaltung der Systemlösung.
	1	Ausreichende ergonomische Gestaltung der Systemlösung.
	0	Keine ausreichende ergonomische Gestaltung der Systemlösung.
Erweiter-barkeit	3	Eine Erweiterung ist im laufenden Betrieb mit geringem Aufwand möglich.
	2	Eine Erweiterung ist mit mittlerem hard- und softwareseitigem Aufwand möglich.
	1	Eine Erweiterung ist nur mit großem hard- und softwareseitigem Aufwand möglich.
	0	Es ist keine Erweiterung möglich.

Zur Ermittlung der Gewichtung der Bewertungskriterien wird ein paarweiser Vergleich durchgeführt, in welchem jedes Bewertungskriterium mit jedem anderen Bewertungskriterium verglichen wird. Die Ergebnisse des paarweisen Vergleichs sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Bewertungskriterien

Nr.	Bewertungskriterium	1	2	3	4	5	Summe	Gewichtung	Rang
1	Realisierbarkeit		0	1	1	1	3	15	4
2	Prozesssicherheit	2		2	1	1	6	30	1
3	Flexibilität	1	0		0	1	2	10	5
4	Ergonomie	1	1	2		1	5	25	2
5	Erweiterbarkeit	1	1	1	1		4	20	3

Die Bewertung innerhalb des paarweisen Vergleichs erfolgt dabei nach dem in Tabelle 9 abgebildeten Schema. Dabei wird bewertet, ob ein Bewertungskriterium wichtiger (2 Punkte), gleich wichtig (1 Punkt) oder weniger wichtig (0 Punkte) ist als ein anderes.

Tabelle 9: Bewertungsschema des paarweisen Vergleichs

Punkteverhältnis	Beschreibung
2:0	Bewertungskriterium 1 ist wichtiger als Bewertungskriterium 2
1:1	Bewertungskriterium 1 ist gleich wichtig wie Bewertungskriterium 2
0:2	Bewertungskriterium 2 ist wichtiger als Bewertungskriterium 1

Nachdem die fünf Bewertungskriterien und deren Gewichtung festgelegt wurden, erfolgt die Bewertung der drei verschiedenen Hardwarekonzepte mit Hilfe der Nutzwertanalyse, welche in

Tabelle 10 dargestellt ist.

Tabelle 10: Nutzwertanalyse der drei Hardwarekonzepte

			Konzept 1 (statisch)		Konzept 2 (einachsig)		Konzept 3 (zweiachsig)	
Nr.	Bewertungs- kriterium	Gewichtung (G)	Erfüllungs- grad (E)	G*E	Erfüllungs- grad (E)	G*E	Erfüllungs- grad (E)	G*E
1	Realisierbarkeit	15	3	45	2	30	2	30
2	Prozesssicherheit	30	1	30	2	60	1	30
3	Flexibilität	10	3	30	2	20	1	10
4	Ergonomie	25	2	50	3	75	1	25
5	Erweiterbarkeit	20	1	20	2	40	3	60
Summe				175		225		155

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse zeigen, dass für den vorliegenden Anwendungsfall – bei Bewertung mit den ausgewählten und gewichteten Kriterien – das zweite Konzept als „Systemlösung mit einachsig beweglicher Assistenzeinheit“ am besten geeignet ist. Dies ist teils auf die sehr gute ergonomische Eignung dieser Lösung, teils aber auch auf die durchweg guten Eigenschaften bei der Prozesssicherheit, der Erweiterbarkeit, der Realisierbarkeit und der Flexibilität zurückzuführen.

Das „statische“ und das „zweiachsige“ Konzept sind zwar für die vorliegende Laborumgebung ebenfalls realisierbar, aber für die erweiterte Anwendung im industriellen Bereich weniger tauglich. Gerade bei der „zweiachsigen“ Lösung ist eine Erweiterung des Durchlaufregallagers problemlos möglich, eine zunehmende Anzahl an Kommissionierwagen hingegen erhöht den Erweiterungs-, Realisierungs- und Investitionsaufwand. Da bei diesem Konzept der Kommissionierwagen den kompletten technischen Aufbau des Assistenzsystems beinhaltet, wird für jeden zusätzlichen Kommissionierwagen eine zusätzliche Ausstattung mit den benötigten technischen Komponenten erforderlich. Zudem wird aufgrund des Zusatzgewichtes und durch den sperrigen Aufbau der Assistenzeinheiten ein erhöhter Kraftaufwand erforderlich, um den Kommissionierwagen zu bewegen und an die entsprechenden Kommissionierorte zu steuern. Beim statischen Konzept hingegen gestaltet sich nicht die zunehmende Anzahl an Kommissionierwagen, sondern eine Erweiterung des Durchlaufregallagers problematisch, da für jeweils zwei zusätzliche Regaleinheiten eine Assistenzeinheit (bestehend aus einem Projektor und zwei Kinects) benötigt wird. Aufgrund des niedrigen Gewichts des Kommissionierwagens ist diese Lösung zwar deutlich ergonomischer als die „zweiachsige“, aber die freie Beweglichkeit im Raum erfordert einen zusätzlichen Kraftaufwand, um den Wagen bei voller Beladung zu steuern und an die entsprechenden Zielorte zu bewegen. Bei der „einachsigen“ Lösung ist der Wagen geführt und dadurch

nur in Fahrtrichtung parallel zum Regal beweglich. Dies bedeutet, dass der aufgebrauchte Kraftaufwand in die Fortbewegung des Wagens fließt und keine zusätzliche Anstrengung erforderlich ist, um den Wagen in der gewünschten Spur zu halten.

In Ergänzung zur Nutzwertanalyse wurde eine Grobabschätzung der Investitionskosten der drei Konzepte durchgeführt. Diese Kostenabschätzung wurde anhand der jeweils benötigten Komponenten mit verfügbaren Preisen und Richtangeboten erstellt. Die Grobabschätzung der Material- und Technikkosten für eine Umsetzung der drei Hardwarekonzepte als Prototyp in einer Laborumgebung mit zwei Durchlaufregallagereinheiten und einem Kommissionierwagen ist in

Tabelle 11 aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass hierbei Konzept 1 mit einer statischen Assistenzeinheit die kostengünstigste Variante darstellt. Es zeigt sich jedoch, dass bei einer Erweiterung der Konzepte auf eine praxisnähere Anwendung mit zehn Durchlaufregallagereinheiten die Vorteile von Konzept 2 – vor allem aufgrund der Verschiebbarkeit – kostenseitig wirksam werden. Bei einer weiteren Erweiterung des Konzeptes durch den Einsatz von fünf Kommissionierwagen bei zehn Durchlaufregallagereinheiten werden die Nachteile von Konzept 3 durch den einzelnen Aufbau der Assistenzeinheiten auf jedem eingesetzten Kommissionierwagen ersichtlich. Hierbei liegen die Investitionskosten für die Implementierung der Assistenzeinheit für jeden weiteren Kommissionierwagen bei ca. 10.800 €, wobei für diese Kalkulation die Investitionskosten der Wagen nicht mit einbezogen werden, sondern allein die Kosten für die Installation einer weiteren Assistenzeinheit Berücksichtigung finden. Dies bedeutet, dass bei Konzept 1 und 2 weitere Kommissionierwagen ohne zusätzliche Umrüst- oder Umbaukosten eingesetzt werden können, da die gesamte Hardware für die Verwendung der Assistenzeinheiten allein regalseitig verbaut wird und die Wagen unbeeinträchtigt bleiben. Bei Konzept 3 hingegen wird die Hardware zur Verwendung der Assistenzeinheiten primär auf den Kommissionierwagen verbaut.

Tabelle 11: Grobabschätzung der Material- und Technikkosten der drei Hardwarekonzepte für einen Laboraufbau

Pos.	Beschreibung	Kosten/ Stk	Konzept 1 (statisch)		Konzept 2 (einachsrig)		Konzept 3 (zweiachsrig)	
			Anzahl (Stk.)	Gesamt- kosten	Anzahl (Stk.)	Gesamt- kosten	Anzahl (Stk.)	Gesamt- kosten
1	Projektor	800 €	1	800 €	2	1.600 €	2	1.600 €
2	Kinect	200 €	2	400 €	2	400 €	2	400 €
3	Rechner	800 €	1	800 €	1	800 €	1	800 €
4	Linearschienen	650 €	0	0 €	2	1.300 €	0	0 €
5	Wegmesssystem	600 €	0	0 €	1	600 €	0	0 €
6	Akkumulator	5.000 €	0	0 €	0	0 €	1	5.000 €
7	Trackingsystem	4.000 €	0	0 €	0	0 €	1	4.000 €
8	Rahmenaufbau	2.000 €	1	2.000 €	1	2.000 €	1	2.000 €
9	Sonstiges	1.000 €	1	1.000 €	1	1.000 €	1	1.000 €
Material- und Technikkosten für die Nutzung bei 2 Regalen und 1 Wagen				5.000 €		7.700 €		14.800 €
Material- und Technikkosten für die Nutzung bei 10 Regalen und 1 Wagen				25.000 €		14.500 €		14.800 €

Material- und Technikkosten für die Nutzung bei 10 Regalen und 5 Wagen <sup>18</sup>	25.000 €	14.500 €	58.000 €
--	----------	----------	----------

### 6.3.5 Simulation des ausgewählten Aufbaus mit Hilfe eines CAD-Modells

Für die weitere Detaillierung der ausgewählten Variante einer mobil geführten Lösung werden in einem ersten Schritt die bereits ausgewählten und bestehenden Hardware-Elemente des Kommissioniersystems in einem CAD-Modell (Computer-Aided Design) abgebildet. Hierfür werden das Durchlaufregallager, der Kommissionierwagen und die technischen Funktionseinheiten (Projektoren, Kinects, Waage) mit einer CAD-Software modelliert und in einem möglichst kompakten Aufbau zueinander angeordnet. Zusätzlich zur Bauform wird bei den Projektoren jeweils der Projektionsraum und bei den Kinects der Erfassungsraum anhand der technischen Daten abgebildet (siehe Abbildung 41).

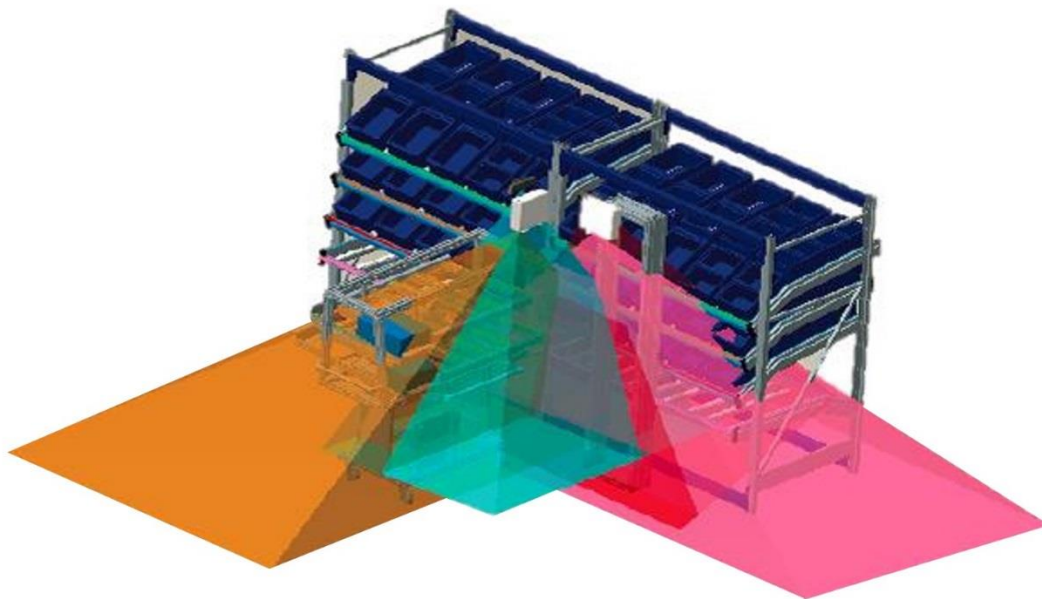


Abbildung 41: Simulation des Hardwareaufbaus mit den Projektions- und Erfassungsräumen der beiden Kinects (grüne und rote Pyramide) und Projektoren (orangefarbene und pinke Pyramide)

Die Simulation dient zur Ermittlung der idealen Positionen, Höhen und Neigungen der vier Komponenten in der jeweiligen Anordnung am Durchlaufregallager oder am Kommissionierwagen. Zur Sicherstellung der bestmöglichen Auflösung sollen die Kinects und Projektoren in möglichst kurzer Distanz zum Projektions- oder Überwachungsort angebracht werden. Trotz der unterschiedlich großen Projektions- und Überwachungsräume sollten die beiden Komponenten möglichst nah beieinander befestigt werden, um eine gemeinsame Ausrichtung und Justierung zu ermöglichen. Die vier Durchlaufregal- und die zwei Kommissionierwagenebenen sind versetzt zueinander befestigt. Um jedoch einen größtmöglichen Bereich innerhalb der einzelnen Ebenen zu erreichen bzw. zu erfassen, müssen die beiden Projektoren und Kinects in einem geringen Abstand zum Durchlaufregallager bzw. Kommissionierwagen befestigt werden.

<sup>18</sup> Die fünf Wagen befinden sich jedoch nicht gleichzeitig im Kommissioniereinsatz, sondern sind im Umlauf, stehen als Puffer oder in unterschiedlicher Ausführung für verschiedene Artikeltypen für einen etwaigen Bedarfsfall zur Verfügung.

### 6.3.6 Testaufbau in Laborumgebung

Die innerhalb des CAD-Modells ermittelten Positionen dienen zur Simulation eines realen Arbeitsablaufs. Hierzu wird ein Testaufbau als Hilfskonstruktion aus Aluminiumprofilen realisiert, um daran die Absicherung gegenüber störenden Umgebungseinflüssen sowie die Feinjustierung bzw. -anordnung der Komponenten zu erproben (siehe Abbildung 42). Unter alleiniger Zuhilfenahme von CAD-Daten ist es nicht möglich, Umgebungseinflüsse und externe Störquellen wie z.B. reflektierende Oberflächen, Sonneneinstrahlung, Leuchtstoffröhren oder die Infrarotstrahlung von Heizungen zu berücksichtigen. Auch der mögliche Einfluss einer Verdeckung oder eines Schattenwurfs durch Bauteile oder den Kommissionierer selbst soll in dem Aufbau simuliert und überprüft werden.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise soll Nacharbeit durch Anpassungen und Änderungen des Gesamtaufbaus und damit ein zusätzlicher Zeit- und Kostenaufwand in der Realisierungsphase verhindert werden. Die Umsetzung des Testaufbaus basiert auf den im CAD-Modell ermittelten theoretischen Maßen.



Abbildung 42: Testaufbau in Laborumgebung



Abbildung 43: RGB- und Tiefenbild der Kinect auf Seite des Durchlaufregallagers

Nach dem Aufbau werden einige Kommissionierabläufe simuliert und die Projektion bzw. die Qualität der Tiefendaten zur Entnahme- und Ablagekontrolle der Kinects getestet. Zur Verringerung eines Schattenwurf- und Verdeckungseffekts werden die einzelnen Komponenten geringfügig in Winkel und Position nachjustiert. Die mit dem Testaufbau ermittelten RGB (Rot, Grün, Blau)- und Tiefenbilder der Kinects sind exemplarisch für die Assistenzeinheit des Durchlaufregallagers in Abbildung 43 dargestellt.

## **6.4 Auswahl der technischen Funktionselemente**

In diesem Abschnitt erfolgt die Auswahl aller weiteren Funktionselemente und -baugruppen des technischen Aufbaus, die für das Zusammenspiel der bisher vorhandenen bzw. ausgewählten Komponenten sowie für die Funktionsweise des Assistenzsystems erforderlich sind. Hierzu zählen das Rahmengestell, die Linearführungen, das Wegmesssystem, die Kopplungseinheit von Durchlaufregallager und Kommissionierwagen, die Höhenverstellung der Waage sowie sonstige kleinere Funktionselemente.

### **6.4.1 Rahmengestell zur Verbindung von Kommissionierwagen und Durchlaufregallager**

Das Rahmengestell dient zur Verbindung des Kommissionierwagens mit dem Durchlaufregallager sowie zur Befestigung der zwei Assistenzeinheiten. Es integriert eine Kopplungsfunktion (siehe Kap. 6.4.4) und ist mittels einer Lagerung auf zwei Linearschienen mobil ausgeführt. Um eine gute und sichere Kraftübertragung vom Kommissionierwagen auf die Linearführungen zu ermöglichen, muss das Rahmengestell möglichst stabil und verwindungssteif ausgeführt werden. Zugleich soll es aber auch möglichst kompakt und leicht gebaut sein, um das bewegen des angekoppelten Kommissionierwagens samt Rahmengestell zu erleichtern. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, die Konstruktion mit stranggepressten Halbzeugen aus einer Aluminiumlegierung auszuführen. Aufgrund der „verstreuten“ Profilquerschnitte weisen diese sogenannten Aluminiumprofile (kurz Aluprofile) eine hohe Biegefestigkeit und Stabilität bei gleichzeitig geringem Gewicht und hoher Korrosionsbeständigkeit auf. Zusätzlich können in die Aluprofile Längsnuten integriert werden, in die ohne eine vorbereitende spanende Bearbeitung Verbindungselemente wie z.B. Nutensteine oder Hammermuttern als Widerlager für Schrauben eingeführt werden, um dadurch eine flexible, stabile und kostengünstige Befestigung zu ermöglichen. Die Aluprofile sind in unterschiedlichen Profilarten, -querschnitten und -abmessungen sowie mit verschiedenen Verbindungselementen und Funktionszubehör erhältlich und konfigurierbar. Für den Aufbau des Rahmengestells werden die Profilarten 32x32, 40x40, 50x50 und 50x100 der Firma Schnaithmann verwendet, welche über Verbindersätze miteinander verbunden werden.

### **6.4.2 Linearführungen**

Eine Assistenzeinheit mit einem Projektor und einer Kinect hat (bei der im Testaufbau ermittelten Befestigungshöhe) einen auf ca. 1,5 x 1,5 m begrenzten Wirkungsbereich. Aufgrund dieser Ausgangslage und der Entscheidung für Konzept 2 als geführte mobile Lösung ist es erforderlich, das Assistenzsystem dynamisch zu gestalten und die Assistenzeinheit analog zur Fortbewegung des Kommissionierwagens linear mitzubewegen. In der industriellen Anwendung sind die Längen von Kommissionierregalen nach oben hin variabel ausbaubar. Dabei erfolgt die Anordnung der einzelnen Regaleinheiten meist nebeneinander in linearer Form. Zur Erfüllung dieser Kriterien werden als Maschinenelemente für translatorische Bewegungen „Linearführungen“ ausgewählt und eingesetzt. Zusätzlich zu den genannten Anforderungen wird mit Linearführungen eine genaue Lagebestimmung und -genauigkeit der geführten Teile sowie eine Aufrechterhaltung der gewünschten Position auch unter Krafteinwirkung erreicht, wobei ein Ecken, Kippen, Abheben oder Entgleisen verhindert wird. Darüber hinaus weisen sie einen nur geringen Verschleiß und niedrige Reibungskräfte auf, ermöglichen leichte und positionsgenaue Verstellbewegungen und sind in Fertigung, Montage und Wartung hoch wirtschaftlich.

Im Allgemeinen werden Linearführungen nach der

- freien Bewegung in Rund- und Geradführungen,
- Art der Führungsflächentrennung in Gleitführungen und Wälzführungen und
- Querschnittsform z.B. in Flachführungen (Rechteckform), Schwalbenschwanzführungen (Dreiecksform) und Säulenführungen (Kreisform) unterschieden (vgl. Haberhauer und Bodenstein 2014; Hirsch 2012).

Die Auswahl der geeigneten Führungsart für die Anwendung im Kommissioniersystem erfolgt anhand der in Tabelle 12 abgebildeten Bewertung verschiedener Führungsprinzipien. Dabei werden die beiden gängigsten Führungsprinzipien einer Linearwälzführung und einer Gleitführung mit ihren Untergruppierungen (anhand des physikalischen Prinzips) bewertet und gegenübergestellt.

Für den vorliegenden Anwendungsfall sind vor allem die Merkmale der Leichtgängigkeit, der Verschleißfestigkeit, der Betriebssicherheit, des Standardisierungsgrades und der Kosten von Bedeutung.

Für diese Kriterien überwiegen im vorliegenden Anwendungsfall die Vorteile der Führungsart durch Wälzführungen.

Tabelle 12: Gegenüberstellung verschiedener Führungsprinzipien (vgl. Brecher et al. 2014, Rn. 28; Denkena 2003)

Merkmale	Führungsprinzip				
	wälzend	gleitend			
		hydro-dynamisch	hydro-statisch	aerostatisch	magnetisch
Steifigkeit	+ -	++	++	--	+ -
Leichtgängigkeit	+ -	--	++	++	++
Verschleißfestigkeit	+ -	--	++	++	++
Stick-Slip-Freiheit	++	+ -	++	++	++
Betriebssicherheit	++	++	+ -	+ -	+ -
Standardisierungsgrad	++	--	--	--	--
Tragfähigkeit	++	++	++	--	++
Kosten	Mittel	Niedrig	Hoch	Hoch	Hoch

Deshalb wird für die geführte translatorische Bewegung der Assistenzeinheit mit dem gekoppelten Kommissionierwagen ein Kompaktwälzführungssystem ausgewählt, das aufgrund der großen Wegstrecke von ca. 4000 mm zusätzlich mit einer Wälzkörperrückführung ausgestattet wird. Ferner ist diese Führungsart als angetriebene Variante, z.B. mit Hilfe eines Riemens oder einer Zahnstange und eines Ritzels erhältlich. Aus Kostengründen wird im Laboraufbau auf diesen Zusatz verzichtet. Mit geringen Anpassungen ist es jedoch auch zu einem späteren Zeitpunkt möglich, einen Antrieb nachzurüsten.

Die Auswahl eines Anbieters erfolgt mit Hilfe eines kaufmännischen Vergleichs, indem die Angebote von vier erfahrenen Anbietern gegenübergestellt wurden. Die Angebote wurden auf Basis einer einheitlichen Anfrage für zwei lineare Profilschienen mit einem Querschnitt von ca. 25 x 20 mm (B x H) und einer Länge von je 4000 mm sowie für fünf zugehörige Führungswagen erstellt.

Aufgrund des kostengünstigsten Angebots und der Möglichkeit der persönlichen Beratung sowie Unterstützung bei der Auswahl und Dimensionierung der Komponenten wird entschieden, die Führungsschienen „TR 25-H“ und die Führungswagen „TRH25FE/TRH25VE“ des Anbieters „LTK Lineartechnik Korb GmbH“ einzusetzen.



### 6.4.3 Wegmesssystem

Zur Erfassung des Lageistwertes bzw. zur Messung des Abstands zwischen der jeweiligen Position des Rahmengestells mit den Assistenzsystemen und dem Zielort der Entnahme soll ein Wegmesssystem eingesetzt werden. Dabei dient der ermittelte Abstand als Ausgangssignal für die Anleitung des Verschiebeprozesses und der Verschieberichtung sowie für die anschließende Visualisierung des korrekten Entnahmeortes.

Die derzeit am Markt verfügbaren Wegmesssysteme lassen sich nach

- dem Messverfahren in absolute oder inkrementale Systeme,
- dem Messprinzip in optische, magnetische, induktive oder ultraschallbasierte Systeme,
- der Messwerterfassung in analoge oder digitale Systeme und
- der Messwertabnahme in rotatorische oder translatorische Systeme

einteilen (vgl. Neugebauer 2012; Bahmann 2013).

Ausgehend von den bereits ausgewählten Linearführungen gibt es zur Messwerterfassung der translatorischen Bewegungen verschiedene Möglichkeiten. Die drei gängigen Technologien der linearen Längen- oder Wegmessung, die sich für den vorliegenden Anwendungsfall eignen, sind

- die Messung mittels magnetischem Sensor und Magnetband,
- die Messung mittels einem Seilzugsensor oder
- die Messung mittels einem Messradsystem mit Drehgeber (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44: Gängige Technologien für lineare Längen- oder Wegmessung: Magnetisches Messsystem (links), Seilzugsensor (Mitte), Messradsystem (rechts) (Fritz Kübler GmbH)

Diese Messsystemarten werden im Folgenden kurz erläutert, ihre Vor- und Nachteile dargestellt, die Systeme miteinander verglichen und das am besten bewertete ausgewählt.

Bei einem **magnetischen Längenmesssystem** tastet ein Sensorkopf die sinusförmigen Magnetfelder oberhalb des magnetischen Maßbands berührungslos ab. Dabei wird durch den Wechsel der Magnetfelder eine Spannung in Form einer Impulswelle induziert, die wiederum mit Hilfe eines Analog-/Digital-Wandlers in ein Rechtecksignal digitalisiert wird. Die Polteilungen bzw. die senkrechten Flanken der Impulswelle stellen jeweils ein Inkrement dar. Bei einer Bewegung des Magnetsensors wird die Anzahl der Polwechsel gezählt, Zwischenwerte interpoliert und daraus die entsprechende Bewegungsdifferenz berechnet. Magnetische Messsysteme sind sowohl in inkrementaler, als auch in absoluter (Zweispursysteme) Ausführung erhältlich. Die Vorteile der magnetischen Längenmesstechnik sind die berührungslose und dadurch verschleißfreie Abtastung, die Unempfindlichkeit gegenüber Staub, Feuchtigkeit, Ölen etc., die hohe Schock- und Vibrationsfestigkeit, die Realisierung von großen Messlängen, die einfache Handhabung und Installation und die hohe Auflösung (0,005 – 1 mm) sowie Wiederholgenauigkeit (vgl. Fritz Kübler GmbH). Nachteilig hingegen ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Fremdmagnetfeldern.

Die zweite gängige Technologie zur Längen- oder Wegmessung ist der **Seilzugsensor**. Diese Art von Messsystem basiert auf einem Messseil, welches auf einer Trommel einlagig aufgewickelt ist und dadurch eine hohe Linearität über den kompletten Messbereich garantiert. Bei Auszug des Seils erfolgt eine Rotationsbewegung der Seiltrommel. Ein direkt mit der Trommelachse verbundener Drehgeber registriert diese Drehung und erzeugt proportional zur Seilbewegung (auf Basis des Drehwinkels und des Trommeldurchmessers) ein beliebig verwertbares elektrisches Messsignal. Der Rücklauf des Seils erfolgt über eine Triebfeder auf der Drehwelle der Trommel. Die Vorteile dieses Messsystems sind die Robustheit, die hohen Verfahrensgeschwindigkeiten, die hohen Beschleunigungswerte und die einfache Handhabung und Installation (vgl. Fritz Kübler GmbH). Nachteilig sind die geringere Messgenauigkeit gegenüber magnetischen Längenmesssystemen, die begrenzten Messlängen und die hohe Schwingungsempfindlichkeit.

Die dritte gängige Art der Linearmessung erfolgt mit Hilfe eines **Messrades**. Bei dieser Variante ist das meist einseitig gelagerte Messrad auf einem Drehgeber befestigt und rollt auf der zu messenden Oberfläche ab. Das Messrad wird dabei mit Federdruck auf die Messoberfläche aufgedrückt, um Stöße abzufedern und „Schlupf“ zu vermeiden. Anhand der vom Messrad auf den Drehgeber übertragenen Rotation wird ausgehend vom Drehwinkel und Messradumfang die zurückgelegte Wegstrecke errechnet. Abhängig vom eingesetzten Drehgeber kann inkremental oder absolut gemessen werden. Die Vorteile einer Messradanwendung sind der robuste Aufbau, die Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen wie Staub, Ölen oder auch Vibrationen, die theoretisch unbegrenzte Messlänge (bei inkrementaler Ausführung), die hohen Verfahrensgeschwindigkeiten und die einfache Handhabung und Installation (vgl. Fritz Kübler GmbH). Nachteilig wirkt sich aus, dass über die gesamte Messlänge definierte und plane Laufflächen benötigt werden, die Bauform verhältnismäßig groß ist und geringere Mess- und Wiederholgenauigkeiten als bei den anderen beiden Verfahren möglich sind.

Die Auswahl des am besten geeigneten linearen Längen- oder Wegmesssystems erfolgt ebenfalls mit paarweisem Vergleich und einer anschließenden Nutzwertanalyse.

Die Bewertung anhand der Kriterien Erweiterbarkeit, Prozesssicherheit, Baugröße, Robustheit und Installationsaufwand ergibt, dass das „magnetische Linearmesssystem“ für den vorliegenden Anwendungsfall in der Kommissionierung am besten geeignet ist.

Für die Auswahl eines Anbieters werden in einem kaufmännischen Vergleich jeweils ein absolutes und ein inkrementales Messsystem von drei erfahrenen Anbietern gegenübergestellt. Die Basis für die Angebotserstellung bildete eine einheitliche Anfrage für ein 4000 mm langes Magnetband mit Messgeber, welches in einem industriellen Umfeld eingesetzt werden soll. Die Messsysteme der verschiedenen Anbieter sind laut technischen Daten und Referenzen vergleichbar in ihrer Ausführung und Qualität.

Der Anbieter „ELGO Electronic“ mit seinen Messsystemen des Typs „EMAL“ und des Typs „LMIX2“ ist für beide Systeme der kostengünstigste Anbieter. Aufgrund des Vorteils, dass der Positionswert unmittelbar nach dem Einschalten zur Verfügung steht und jederzeit von der Steuerung abgerufen werden kann, wird trotz der Mehrkosten für das vorliegende System das Messsystem in absoluter Ausführung ausgewählt (vgl. Bahmann 2013). Durch den Wegfall der Referenzfahrt entfällt ein Arbeitsgang, die Wegzeiten reduzieren sich und der Bedienkomfort für den Nutzer steigt.

#### **6.4.4 Kopplungsfunktion zwischen Kommissionierwagen und Rahmengestell**

Aufgrund der Auswahl des „statischen Konzepts“ muss der jeweils zu bestückende Kommissionierwagen an das Rahmengestell gekoppelt werden. Die Kopplung dient der Ausrichtung und Positionierung des Kommissionierwagens relativ zu den Assistenzeinheiten. Zusätzlich wird durch

die Kopplung eine lineare Spurführung des Kommissionierwagens vorgegeben, was wiederum das Mitbewegen und Verschieben des Kommissionierwagens für den Kommissionierer erleichtert. Zudem wird durch die Kopplung der kleinstmögliche Abstand zum Durchlaufregal sichergestellt, eine ergonomische Arbeitsweise begünstigt und der Arbeitsaufwand bzw. die Wegstrecken während des Kommissionierprozesses für den Kommissionierer möglichst gering gehalten.

Für die Realisierung einer Kopplung werden drei mögliche Kopplungsvarianten betrachtet (siehe Abbildung 45) und das am besten geeignete Konzept mittels paarweisem Vergleich und Nutzwertanalyse ermittelt.

Als erste Variante wird eine mechanische Kopplung betrachtet, welche manuell z.B. über die Ver- und Entriegelung eines Arretierbolzens oder eines Hand-Schnellspanners erfolgen könnte. Die zweite Variante einer elektromechanischen Kopplung könnte mittels eines elektrisch betätigten Verriegelungsbolzens oder Elektro-Schwenkspanners ausgeführt werden. Die dritte Variante könnte einen Permanentmagneten verwenden, der durch die Betätigung eines Schalters und eine dadurch ausgelöste Bestromung neutralisiert<sup>19</sup> wird, um eine Kopplung zu lösen.


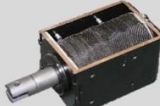



Mechanisches Prinzip	Elektromechanisches Prinzip	Elektromagnetisches Prinzip
 <p>Arretierbolzen</p>	 <p>Elektrisch betätigter Verriegelungsbolzen</p>	 <p>Permanentelektromagnet</p>
 <p>Hand-Schnellspanner</p>	 <p>Elektro-Schwenkspanner <small>Bildquelle: <a href="http://www.roemheld-gruppe.de/shop/media/catalog/category/818310.gif">http://www.roemheld-gruppe.de/shop/media/catalog/category/818310.gif</a></small></p>	

Abbildung 45: Drei verschiedene Kopplungsprinzipien

Die Bewertung anhand der Kriterien Flexibilität, Robustheit, Bedienkomfort, Baugröße und Installationsaufwand ergibt, dass das elektromagnetische Kopplungsprinzip via „Permanentmagnet“ für den vorliegenden Anwendungsfall in der Kommissionierung am besten geeignet ist und umgesetzt werden kann. Der Hauptvorteil dieser Lösung ist die große Flexibilität bzgl. der Verwendung von verschiedenen oder mehreren Kommissionierwagen. An diesen muss in Höhe der Permanentmagneten lediglich eine Stahlplatte angebracht werden. Nach einem kaufmännischen Vergleich erfolgt die Umsetzung mit zwei Permanentelektromagneten des Typs ITS-PE 5029 der Firma Intertec Components GmbH mit einer Haltekraft von jeweils 500 N. Diese werden in das Aluminiumprofil integriert und mit einem manuellen Wippschalter verbunden. Zur definierten Positionierung des Kommissionierwagens wird ein auf Linearschienen geführter und über einen Rahmenmagneten (Typ: ITS-LS 5852) angesteuerter Anschlag mit einem Hub von 40 mm und einer Kraft von 35 N angebracht, welcher ebenfalls über den manuellen Wippschalter angesteuert wird. Die realisierte Kopplung und der Anschlag sind in Abbildung 46 als CAD-Modell dargestellt.

<sup>19</sup> Das magnetische Feld des Permanentmagneten kann durch eine Bestromung neutralisiert werden, d.h. ein bestromter Elektromagnet hebt das Magnetfeld des Permanentmagneten auf.

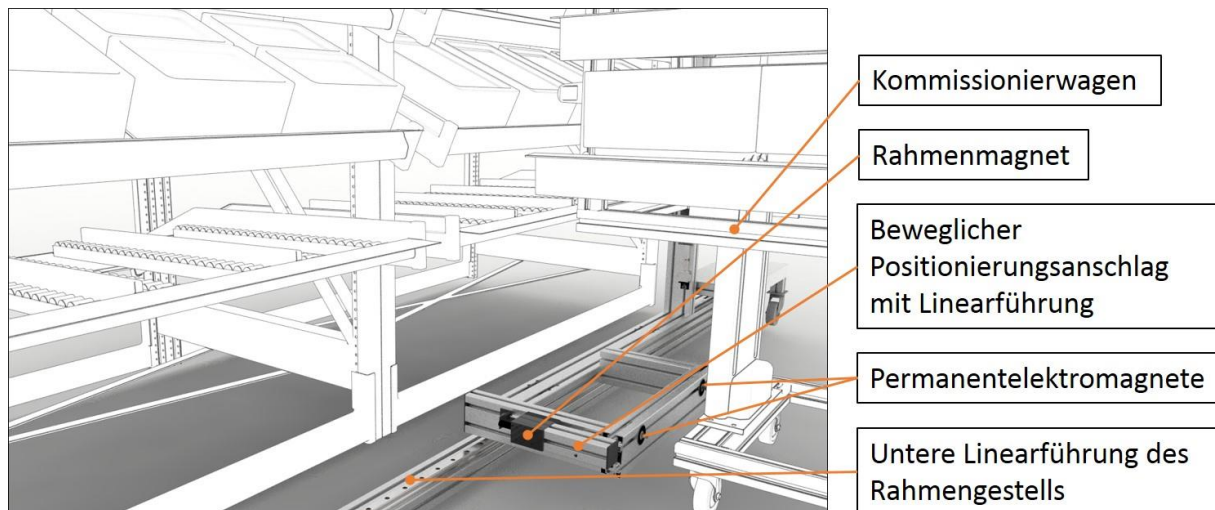


Abbildung 46: Kopplungseinheit des Rahmengestells

#### 6.4.5 Höhenverstellung der Waage

In Kapitel 6.2.3 wurde als Funktionseinheit zur Mengen- und Identitätsüberwachung eine Industriewaage ausgewählt. Im Hinblick auf eine ergonomische Arbeitsgestaltung soll diese höhenverstellbar am Rahmengestell befestigt werden. Die Umsetzung erfolgt mittels einer Linearführungsschiene und einem darauf laufenden Führungswagen, mit dem die Plattform der Industriewaage verbunden ist. Die stufenlose Verstellung bzw. Arretierung der Industriewaage erfolgt über einen Klemmhebel (siehe Abbildung 47). Zur Verhinderung einer ungewollten Höhenveränderung beim Lösen des Klemmhebels und zur Verringerung des Kraftaufwands bei der Verstellung soll ein Gewichtsausgleich integriert werden. Dieser dient zur Kompensation der Gewichtskraft der Industriewaage inklusive der daran befestigten Plattform mit Hilfe einer entgegengesetzten Kraft, welche z.B. über ein Gegengewicht oder einen Federzug aufgebracht werden kann. Hierdurch entsteht beim Lösen des Klemmhebels eine ausgeglichene Ruhelage, die durch geringen Kraftaufwand in die gewünschte Arbeitshöhe verändert werden kann. Zur Erzeugung eines solchen statischen Gleichgewichts mittels einer konstanten Gegenkraft wird für den vorliegenden Anwendungsfall der Einsatz eines Seilzugs mit Umlenkrolle und Gegengewicht (bekannt aus Aufzügen, Tafeln, Garagentoren) oder der Einsatz eines Federzugs (bekannt von Werkzeugaufhängungen) in Betracht gezogen. Der Vorteil eines Gegengewichts ist die einfache und kostengünstige Umsetzbarkeit. Nachteilig ist der zusätzlich benötigte Bauraum für das Gegengewicht. Beim Federzug wird durch das Ausziehen des Tragseils eine Spiralfeder gespannt, wodurch sich das resultierende Drehmoment und damit die Rückzugskraft der Triebfeder erhöht, je weiter man das Seil auszieht. Um die Industriewaage samt Plattform und Führungswagen im statischen Gleichgewicht zu halten, muss die erzeugte Federkraft in derselben Gewichtgröße ausgeführt werden. Vorteilhaft sind die kompakte Baugröße und die einfache Installation. Von Nachteil sind die höheren Investitionskosten.

Die Berechnung eines Gegengewichts bei der Seilzugvariante ergibt für ein im Aluminiumprofil (Querschnitt 50 x 100 mm) verlaufendes Stahlgewicht eine Höhe von  $H = 1388,2 \text{ mm}$ . Eine Gegengewichtslösung ist jedoch bei einer solchen Gewichtshöhe nicht mehr im Inneren des Aluminiumprofils realisierbar. Da eine Anbringung des Gegengewichts aus arbeitsschutzrechtlichen

und optischen Gründen nicht außerhalb des Aluminiumprofils erfolgen soll, fällt die Entscheidung auf die Umsetzung der Federzugvariante.

Hierfür wird nach einem kaufmännischen Vergleich ein Federzug des Herstellers „Ralf Brinkmann“ und

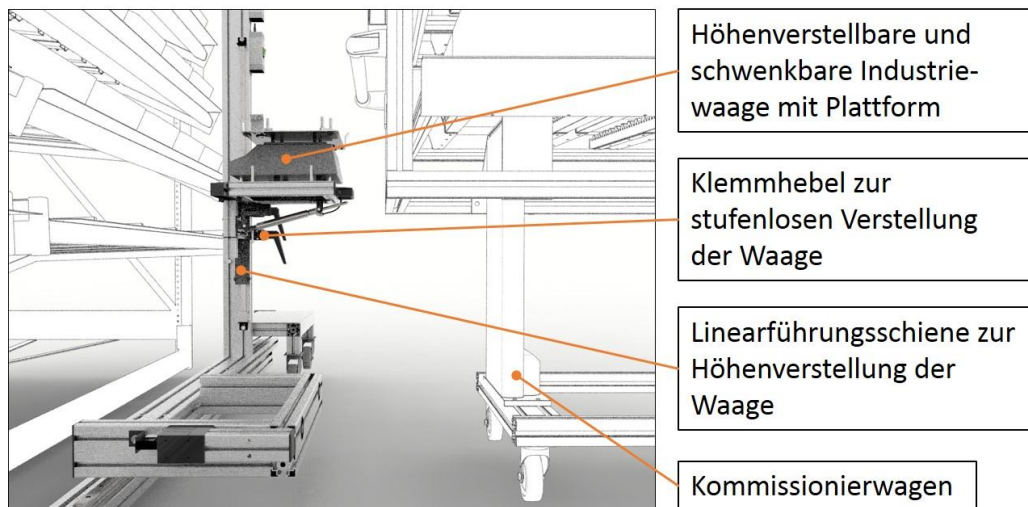


Abbildung 47: Höhenverstellung der Waage

des Typs „RBB 637“ mit einer Tragkraft von 10-14 kg sowie einer Baugröße von 192 x 192 x 100 mm ausgewählt. Dieser wird oberhalb des Rahmengestells befestigt. Das Tragseil wird über eine Seilrolle umgelenkt und innerhalb der Profilnut – unsichtbar und sicher – geführt. Im Gegensatz zur Gegengewichtsvariante ist diese Lösung kompakt, gut geschützt und für den Kommissionierer kaum wahrnehmbar in das Gesamtsystem integriert.

#### 6.4.6 Sonstige Funktionselemente

Aufgrund der Beweglichkeit des Rahmengestells und der daran befestigten Assistenzeinheiten und Rechner müssen die zur Energie- und Datenversorgung erforderlichen Kabel flexibel in der Länge verlegt werden. Zum Schutz, zur Führung sowie zur Einhaltung des kleinsten zulässigen Biegeradius der Kabel wird hierfür eine **Energieführungskette** eingesetzt. Dieses mechanische Maschinenelement besteht aus gelenkig verbundenen Kettengliedern, wobei das eine Kettenende ortsfest mit dem Regal verbunden ist und das andere am beweglichen Rahmengestell befestigt wird.

Die Einrichtung und Bedienung der Assistenzsystemsoftware erfordert ein zusätzliches Visualisierungsmedium. Hierfür wird ein **Touchscreen** des Herstellers Acer und des Typs T232HLBMIDZ eingesetzt. Der Einsatz eines Touchscreens für die Bedienung des Assistenzsystems hat viele Vorteile: direkte und intuitive Bedienung, hohe Flexibilität in der Oberflächengestaltung, Unabhängigkeit von Hardwarelementen (z.B. Maus, Tastatur etc.) sowie die Möglichkeit zur optimalen Anpassung an die mentale Informationsverarbeitung des Menschen (vgl. Zühlke 2012). Des Weiteren stellt der Touchscreen ein zusätzliches Darstellungsmedium für die visuelle Informationsbereitstellung für den Kommissionierprozess dar.

Zur ergonomischen Positionierung des Touchscreens wird ein **Schwenkarm** eingesetzt, der auf der linken Außenseite des Rahmengestells befestigt wird. Durch diese Befestigung im Sichtfeld des Kommissionierers ist es möglich, den Touchscreen als zusätzliches Visualisierungsmedium einzusetzen. Zusätzlich können mit dem Touchscreen aufgrund der fünf beweglichen Achsen des Portalarms große Reichweiten abgedeckt werden. Zugleich wird eine flexible Positionierung in unterschiedlichen Höhen und Neigungen ermöglicht, was gerade für Kommissionierer mit unterschiedlichen Körpergrößen eine ergonomische und entlastende Nutzung des Touchscreens sicherstellt.

Um eine geeignete Projektionsfläche zu bieten, werden auf den Rahmen der einzelnen Regalebenen sogenannte **Projektionswinkel** angebracht. Diese weiß lackierten Blechwinkel dienen zum einen zur Vergrößerung der Projektionsflächen und zum anderen, um Neigung, Reflexion und Flächenkontrast für den Kommissionierer optimal einzustellen.

Für das positionsgenaue Ablegen der zwei unterschiedlichen Behältergrößen wird eine spezielle **Waagenplattform** mit Winkelanschlügen als Positionierungshilfe entwickelt, die zugleich als Projektionsfläche für Informationen zum Ablege-, Wiege- und Aufnahmeprozess der Behälter dient.

## 6.5 Konzeption und Gestaltung des Bedien- und Anleitungssystems

Neben der hardwareseitigen Konzeption und Entwicklung des Assistenzsystems soll nachfolgend die softwareseitige Gestaltung des Bedien- und Anleitungssystems als zweite wichtige Komponente des Assistenzsystems erläutert werden. Als Grundlage hierzu dienen die in Kapitel 5.2.2 analysierten Anforderungen an die Informationsbereitstellung und die in Kapitel 5.3.2 dargestellten Softwareanforderungen sowie der in der vorliegenden Arbeit betrachtete Kommissioniervorgang mit den drei Kernprozessen (siehe Abbildung 34).

Zuerst werden auf Basis der drei abgeleiteten Kernprozesse (siehe Kap. 6.1) und des oben dargestellten Hardwareaufbaus (siehe Kap. 6.2 bis Kap. 6.4) die anzuleitenden Arbeitsschritte analysiert und die für den jeweiligen Arbeitsschritt einzusetzenden Darstellungsmedien festgelegt. Anschließend wird für die jeweils durch Projektion anzuleitenden Arbeitsschritte ein Funktionsmodell für die Informationsübertragung entwickelt. Im Nachgang erfolgt auf Basis der Analyseergebnisse aus Kapitel 4 und der spezifizierten Anforderungen aus Kapitel 5 die Entwicklung und empirische Untersuchung von verschiedenen Anleitungselementen, -inhalten und -stufen. Abschließend werden die Ergebnisse und die daraus resultierenden Anleitungen dargestellt.

### 6.5.1 Analyse der für den Anleitungsprozess darzustellenden Informationen

Die in Kapitel 6.1 beschriebene Unterteilung der Informationsbereitstellung dient als Grundlage für die Analyse der darzustellenden Informationen. Danach sind für eine erfolgreiche Kommissionierung Informationen zum Artikel- bzw. Entnahmeort, zur Entnahmemenge und Teileart sowie zu den jeweiligen Ablageorten erforderlich. Da innerhalb der betrachteten WfbM ein einreihiges Materiallager vorliegt (siehe Kap. 4.1.1) und auch der nachfolgende Laboraufbau aus nur zwei Lagereinheiten besteht (siehe Kap. 7.1 und Kap. 8.2.1), ist keine zusätzliche Navigation zum entsprechenden Lagergang erforderlich.

Deshalb beginnt die Abfolge eines exemplarischen Anleitungsprozesses zur Kommissionierung eines Auftrags mit dem Ankoppeln des Kommissionierwagens am verschiebbaren Rahmengestell. Ab dem zweiten Anleitungsschritt wiederholt sich der Ablauf entsprechend für jede weitere Auftragsposition und endet mit dem Ablegen der letzten Auftragsposition im Kommissionierwagen bzw. dem anschließenden Abkoppeln des Kommissionierwagens. Anhand dieser Prozesselemente lassen sich die nachfolgenden sieben Anleitungsschritte (siehe Abbildung 48) unterscheiden:

1. Anleitung des **Ankoppelns** des Kommissionierwagens mit verschiebbarem Rahmengestell
2. Anleitung des **Verschiebeprozesses** bzw. Navigation bis zum jeweiligen Entnahmeort
3. Anzeige des **Entnahmeortes**
4. Anzeige der **Entnahmemenge**
5. Anzeige der **Entnahmeeinheit** (Gesamtbehälter oder Einzelartikel)
6. Anzeige des **Ablageortes** auf der **Waage**
7. Anzeige des **Ablageortes** auf dem **Kommissionierwagen**



Als Darstellungsmedien für eine zielgerichtete Informationsübertragung vom Assistenzsystem auf die Nutzer werden sowohl die ausgewählten Projektoren als auch der vorhandene Touchscreen eingesetzt. Als Anzeigeorte stehen somit die regalseitigen Projektionswinkel, der Touchscreen, die Waagenplattform und die Projektionswinkel des Kommissionierwagens zur Verfügung. Neben den grundlegenden Anleitungsschritten eines Kommissionierprozesses soll das Anleitungssystem bei Bedarf auch Informationen für eine Fehlerrückmeldung bzw. -behebung enthalten.

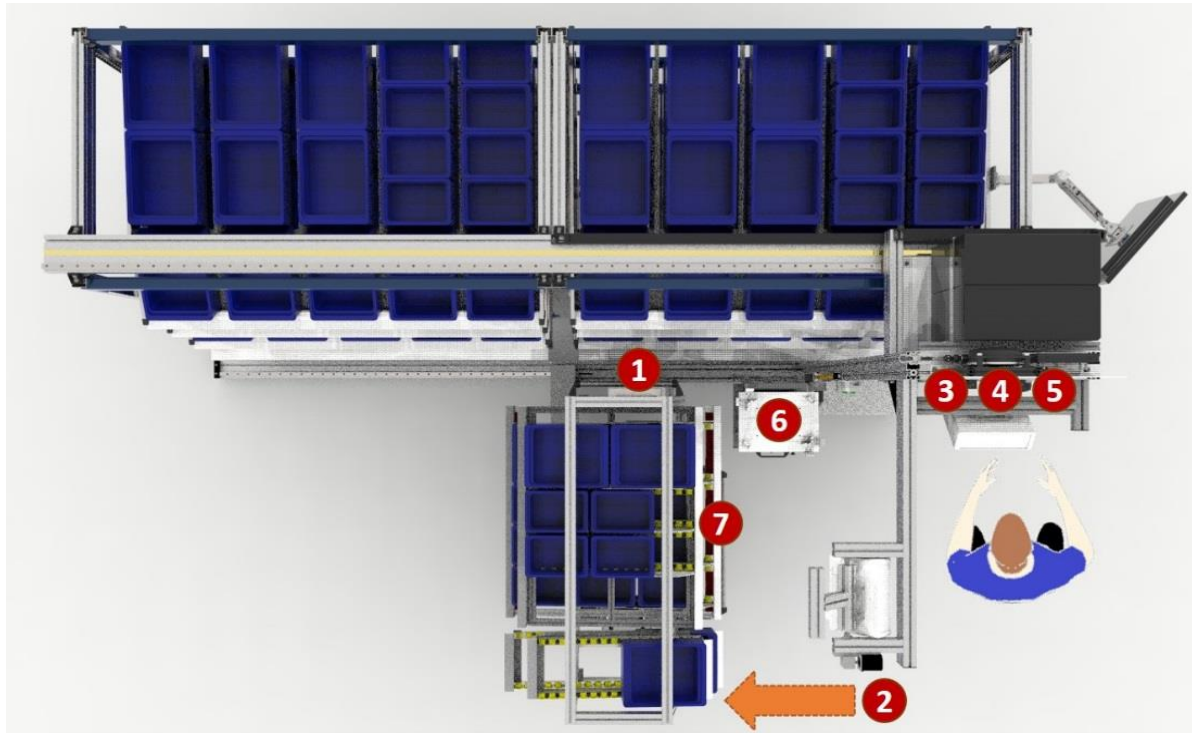


Abbildung 48: Abfolge der sieben Anleitungsschritte in der Draufsicht des Gesamtsystems

### 6.5.2 Entwicklung eines Funktionsmodells für die Informationsübertragung zwischen Assistenzsystem und Kommissionierer bei projizierten Anleitungen

Als Voraussetzung für die weitere Entwicklung eines Anleitungssystems dienen die in Kapitel 2.2.2 erläuterten Grundlagen der Informationsübertragung im Mensch-Maschine-System. Insbesondere das Wissen um die Fähigkeiten, aber auch die Grenzen des Menschen als Kommunikationspartner in einem Arbeitssystem sowie die grundlegenden Kenntnisse über den Informationsfluss beim Menschen stellen elementare Voraussetzungen für die Gestaltung und Entwicklung des Bedien- und Anleitungssystems eines Assistenzsystems dar.

Zusammen mit den in Kapitel 6.2 ausgewählten Hardwarekomponenten (Projektoren als Darstellungsmedium und optische 3D-Sensoren als Kontrolleinheiten) wird auf Basis dieser Grundlagen ein Funktionsmodell der Informationsübertragung des Anleitungssystems entwickelt (siehe Abbildung 49), da die Projektion bisher in der Industrie kein gängiges Informationsmedium darstellt. Dieses Modell beschreibt die Schnittstelle zwischen dem Kommissionierer und dem Assistenzsystem und unterteilt den Prozess der Informationsübertragung in sechs Stufen. Dieser beginnt mit der optischen Informationsausgabe und verläuft kontinuierlich bis zur vollständigen Abarbeitung eines Kommissionierauftrags. Zudem enthält das Modell die drei Kernelemente eines informationstechnischen und kognitiven Assistenzsystems (siehe Kap. 2.4.2): Situationsanalyse, Informationsbereitstellung und Kontrolle.

Das Funktionsmodell dient als Ausgangsbasis für die weitere Konzeptionierung und Gestaltung von projizierten Anleitungselementen.

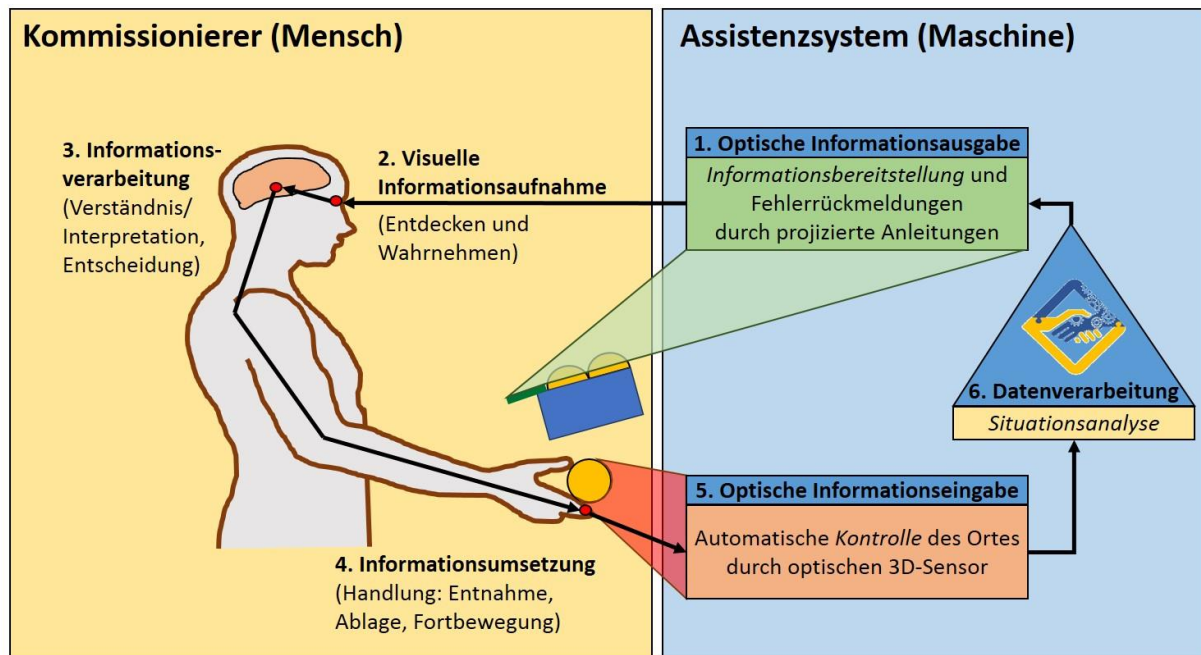


Abbildung 49: Funktionsmodell der Informationsübertragung zwischen Kommissionierer und Assistenzsystem durch Projektion

### 6.5.3 Empirische Untersuchungen zur Entwicklung eines Anleitungssystems für die manuelle PzW-Kommissionierung mit leistungsgeminderten Mitarbeitern

Die nachfolgenden Evaluierungen gehören als Bestandteil der softwareseitigen Systemgestaltung zur dritten Phase der nutzerzentrierten Gestaltung (siehe Kap. 2.5 und Kap. 8.1.2). Das Ziel dieser empirischen Untersuchungen ist es, ein Anleitungssystem zu entwickeln, das durch eine einfache, schnelle und zuverlässige Informationsverarbeitung die mentalen Ressourcen möglichst schont und damit die kognitive Beanspruchung gering hält.

Die Gestaltung der verschiedenen Konzepte orientiert sich an den in Kapitel 5.2.2 und 5.3.2 formulierten Anforderungen an die Informationsbereitstellung und Softwaregestaltung. Dabei sind für die Entwicklung der optisch dargestellten Informationen vor allem eine intuitive und kontextsensitive Gestaltung nach den sieben Grundsätzen der ergonomischen Dialoggestaltung (siehe Kap. 5.3.2) von großer Bedeutung. Dem Kriterium einer bedarfsgerechten und adaptiven Ausführung wird dabei zunächst kein besonderer Schwerpunkt beigemessen, obwohl im Zuge der vorliegenden Arbeit verschiedene Anleitungsstufen entwickelt und evaluiert werden. Für die abschließende Evaluierung des Gesamtsystems (siehe Kap. 9.3) wird von den entwickelten Anleitungsstufen allerdings nur die Anfängerstufe in statischer Ausführung eingesetzt, um sowohl eine hohe Validität sicherzustellen als auch den Entwicklungs- und Implementierungsaufwand für die Software des Anleitungssystems, mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen, realisierbar zu halten. Im Nachgang zu dieser Hauptstudie soll auf Basis der Ergebnisse das Anleitungssystem weiter spezifiziert und adaptiv gestaltet werden. Die für die Entwicklung und Auswahl eines Anleitungssystems für manuelle Kommissionierprozesse mit leistungsgeminderten Mitarbeitern bedeutenden Vorerfahrungen und Voraussetzungen wurden in den folgenden drei Evaluierungen generiert:

1. Studie zum Vergleich von projizierten in situ-Anleitungen (Kontur, Bild, Video) mit der derzeit verwendeten Anleitung per mündlicher Unterweisung im Bereich der manuellen Montage mit leistungsgeminderten Mitarbeitern:

Die Hauptideen dieser Studie für die vorliegende Arbeit sind, dass die visuelle Anleitung per Lichtsignal bzw. Kontur sowohl die geringste Ausführungszeit und Fehlerrate als auch die niedrigste subjektive Beanspruchung bei den Versuchsteilnehmern verursacht.



Die Anleitungsart per Video verursacht zwar die höchste Ausführungszeit und subjektive Beanspruchung, beeinflusst aber die Fehlerrate im Verhältnis zu den anderen drei Anleitungsarten positiv. Die Anleitungsart per Bilder liegt bei allen abhängigen Variablen eher im Mittelfeld.

Die Ergebnisse dieser Studie dienen als Grundlage für die Entwicklung der Anleitungen im Kommissionierbereich. Besonders die drei verschiedenen visuellen Anleitungsarten bilden die Basis für die weitere Entwicklung der einzelnen Kommissionieranleitungen.

Die detaillierten Inhalte und Ergebnisse dieser Studie wurden auf der „*International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA)*“ in Form eines Artikels vorgestellt und publiziert (vgl. Funk et al. 2015).

2. Fragebogenerhebungen zum Vergleich von verschiedenen Anleitungselementen im Kommissionierbereich:

In zwei Evaluationsstufen wurden jeweils auf Basis eines standardisierten Fragebogens verschiedene Anleitungssymbole mit leistungsgeminderten Mitarbeitern verglichen. In der ersten Fragebogenerhebung wurden 26 leistungsgeminderte Mitarbeiter insbesondere zu ihrem Farbenverständnis sowie zu verschiedenen Symbolen in Bezug auf eine Fehlerrückmeldung, eine Entnahmebestätigung, die Anleitung des Verschiebe-, Entnahme- und Ablageprozesses befragt. Anhand der Ergebnisse der ersten Befragung wurden die Anleitungssymbole überarbeitet und ergänzt sowie in einer zweiten Fragebogenerhebung mit 51 weiteren leistungsgeminderten Mitarbeitern evaluiert. Inhaltlich standen dabei vor allem verschiedene Darstellungsvarianten von Zahlen, der Einzelteilentnahme, der Gesamtbehälterentnahme, des Wiegeprozesses sowie des Ankoppelprozesses im Mittelpunkt. Ergebnisse dieser Fragebogenerhebungen wurden bereits auf der „*KES Conference on Intelligent Interactive Multimedia: Systems and Services (KES-IIMSS-15)*“ veröffentlicht (vgl. Baechler et al. 2015a).

3. Praktische Evaluierung von verschiedenen Anleitungsvarianten mit Hilfe eines exemplarischen Kommissionierarbeitsplatzes:

Auf Basis der Ergebnisse der beiden Fragebogenerhebungen werden die jeweils besten Anleitungssymbole miteinander verknüpft und vier verschiedene Anleitungsvarianten erstellt. Anschließend werden die Anleitungsvarianten in einer praktischen Vergleichsstudie mit 25 leistungsgeminderten Mitarbeitern auf Basis eines Testarbeitsplatzes mit einem exemplarischen Kommissionierablauf evaluiert. Als abhängige Variable wurden dabei sowohl die Ausführungszeit und die Fehlerrate als auch die subjektive Beanspruchung auf Basis des modifizierten NASA-TLX (siehe Kap. 8.1.6) gemessen. Zusätzlich fand im Anschluss an jeden Versuchsdurchlauf eine Befragung der Teilnehmer statt.

Die Ergebnisse dieser praktischen Evaluierung zeigen, dass leistungsgeminderte Menschen häufig Probleme mit dem Verständnis bzw. der Interpretation von Symbolen, Piktogrammen oder Fotos haben, welche für normal leistungsfähige Menschen „intuitiv“ nachvollziehbar sind. Dieses Phänomen ist laut Seifert darauf zurückzuführen, dass gerade Symbole, Bilder oder Fotos die Kompetenz zur Abstraktion voraussetzen, um diese Elemente auf den eigenen Alltag zu beziehen, wozu leistungsgeminderte Menschen jedoch häufig nicht in der Lage sind (vgl. Seifert 2006).

Als Ergebnis dieser Untersuchungen werden aufgrund der großen Varianz der Ergebnisse und der damit im Zusammenhang stehenden Leistungs- und Erfahrungsgrade sowie Nutzungsdauern drei Anleitungsstufen abgeleitet.

Diese unterteilen sich jeweils in eine Anleitungsstufe mit

- niedrigem Erfahrungsgrad („Stufe I“: meist bei kurzer Nutzungsdauer und niedrigem Leistungsgrad),
- mittlerem Erfahrungsgrad („Stufe II“: meist bei mittlerer Nutzungsdauer und mittlerem Leistungsgrad) sowie
- hohem Erfahrungsgrad („Stufe III“: meist bei langer Nutzungsdauer und hohem Leistungsgrad).

Zusammen mit diesen Anleitungsstufen und den Ergebnissen haben sich die folgenden vier optischen Anleitungsarten als hilfreich herausgestellt:

- Lichtsignale aus grafischen Formen,
- Piktogramme,
- Fotografien und
- Videos.

Aus den Erkenntnissen der verschiedenen Untersuchungen im Kontext der Entwicklung eines Anleitungssystems kann der Einfluss des Erfahrungsgrades auf die kognitive Beanspruchung in Bezug auf die jeweilige Anleitungsart schematisch in grafischer Form abgebildet werden (siehe Abbildung 50). Diese Darstellung bildet lediglich Tendenzen ab und erhebt keinen Anspruch auf Repräsentativität für die Gesamtheit leistungsgeminderter Menschen.

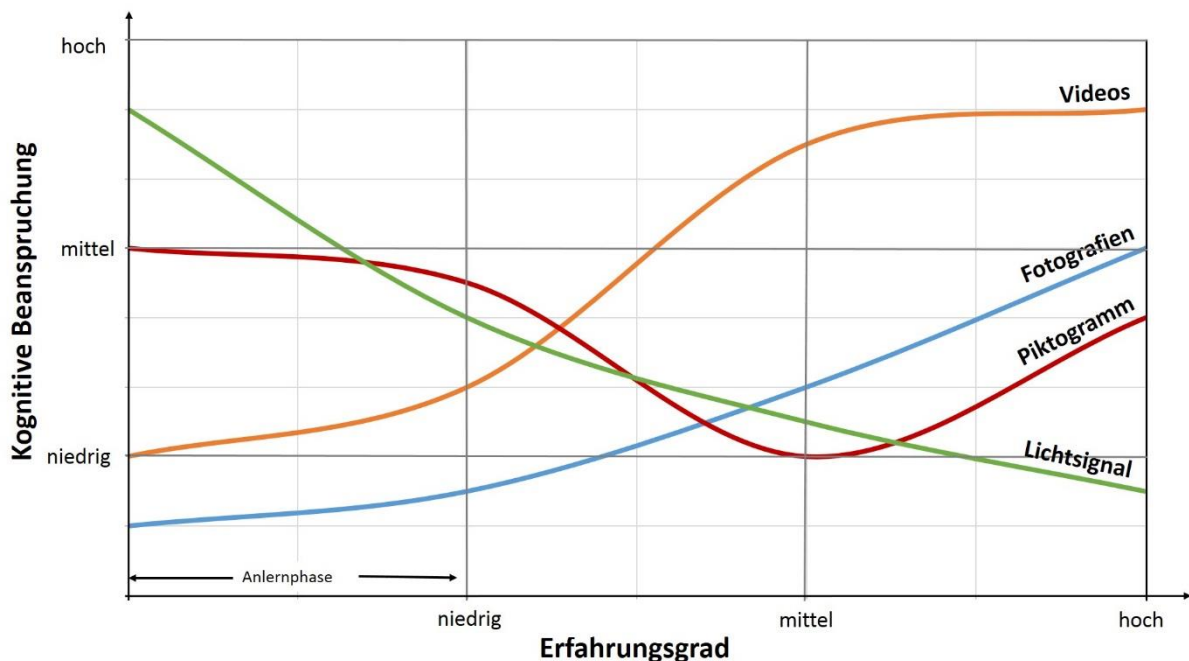


Abbildung 50: Einfluss verschiedener Anleitungsarten auf die kognitive Beanspruchung der Nutzer, bezogen auf den Erfahrungsgrad

Aufgrund der begrenzten inhaltlichen Darstellungsmöglichkeiten werden die empirischen Untersuchungen zum Anleitungssystem in der vorliegenden Arbeit nicht weiter im Detail analysiert und betrachtet, sondern nachfolgend die ausgewählten Anleitungsförm – für alle sieben Anleitungsschritte und drei Anleitungsstufen – exemplarisch für einen Artikeltyp dargestellt.

Die in Kapitel 8 und 9 dargestellten Evaluierungen mit dem Gesamtsystem basieren auf dem Einsatz der ersten Anleitungsstufe „Stufe I“ mit dem niedrigsten Erfahrungsgrad. Die insgesamt zu den drei Anleitungsstufen gewonnenen Ergebnisse dienen als Grundlage für eine Weiterentwicklung des Assistenzsystems, insbesondere des Adaptivitätsmodus, im Anschluss an diese Arbeit.

#### 6.5.4 Darstellung der bestbewerteten Kommissionieranleitung in der Anfängerstufe

Auf Basis der in Kapitel 6.5.1 analysierten darzustellenden Informationen und der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen des vorhergehenden Kapitels werden nun die vier Anleitungsarten mit den sieben Anleitungsschritten sowie den drei festgelegten Anleitungsstufen verknüpft (siehe Tabelle 13). Für die gerichtete Informationsübertragung vom Assistenzsystem auf den Kommissionierer stehen dabei vier verschiedene Darstellungsorte (Touchscreen, regal- oder wagenseitige Projektionswinkel, Waagenplattform) zur Verfügung. Als Darstellungsmedien werden für die Lichtsignale die beiden am Rahmengestell befestigten Projektoren (siehe Abbildung 60) sowie für die Piktogramme, Fotografien und Videos der Touchscreen genutzt. Die Informationsübertragung der ausgeführten Handlungen (wie z.B. der Entnahme oder der Ablage) des Kommissionierers auf das Assistenzsystem erfolgt automatisch über den in Kapitel 6.2.2 ausgewählten optischen 3D-Sensor. Die Kontrolle der Menge und Identität der kommissionierten Artikel hingegen erfolgt über die in Kapitel 6.2.3 ausgewählte Waage.

Tabelle 13: Verknüpfung der Anleitungsarten mit den Anleitungsschritten und -stufen

		Anleitungsstufe		
		Niedriger Erfahrungsgrad („Stufe I“)	Mittlerer Erfahrungsgrad („Stufe II“)	Hoher Erfahrungsgrad („Stufe III“)
Anleitungsschritte	Ankoppeln	Foto + Video	Piktogramm	-
	Verschiebeprozess	Foto + Video + Lichtsignal	Piktogramm + Lichtsignal	Lichtsignal
	Entnahmeort, -menge, -einheit	Foto + Video + Lichtsignal	Lichtsignal	Lichtsignal
	Ablageort Waage	Foto + Video + Lichtsignal	Piktogramm + Lichtsignal	-
	Ablageort Wagen	Foto + Video + Lichtsignal	Lichtsignal	Lichtsignal

Nachfolgend wird die Umsetzung des Anleitungssystems anhand der eingesetzten Darstellungsmedien, der Anleitungsstufen sowie der sieben Anleitungsschritte (siehe Kap. 6.5.1) exemplarisch für die Kommissionierung von neun Einzelteilen bzw. von einem Gesamtbehälter des Artikeltyps „Schraubzwingengriff“ dargestellt.

##### Anleitung des Ankoppelns

Der erste anzuleitende Arbeitsschritt ist das Ankoppeln des Kommissionierwagens mit dem verschiebbaren Rahmengestell. Dieser Prozessschritt wird aufgrund der optimalen Position im Sichtbereich und der Darstellungsgröße allein über den linksseitig am Rahmengestell befestigten Touchscreen angeleitet. Dabei werden in der „Stufe I“ sowohl ein Video des durchzuführenden Prozesses als auch Fotografien von der Kopplungseinheit und von dem zu betätigenden Schalter für die Auslösung der Kopplung eingesetzt (siehe

Abbildung 51, links). Zudem besteht in dieser niedrigsten Anleitungsstufe die Möglichkeit, das Anleitungsvideo nach einem Durchlauf durch Betätigen eines Wiederholungsbuttons erneut anzusehen. In „Stufe II“ wird hingegen auf dem Touchscreen lediglich ein Piktogramm des Ankoppelprozesses angezeigt (siehe Abbildung 51, rechts).

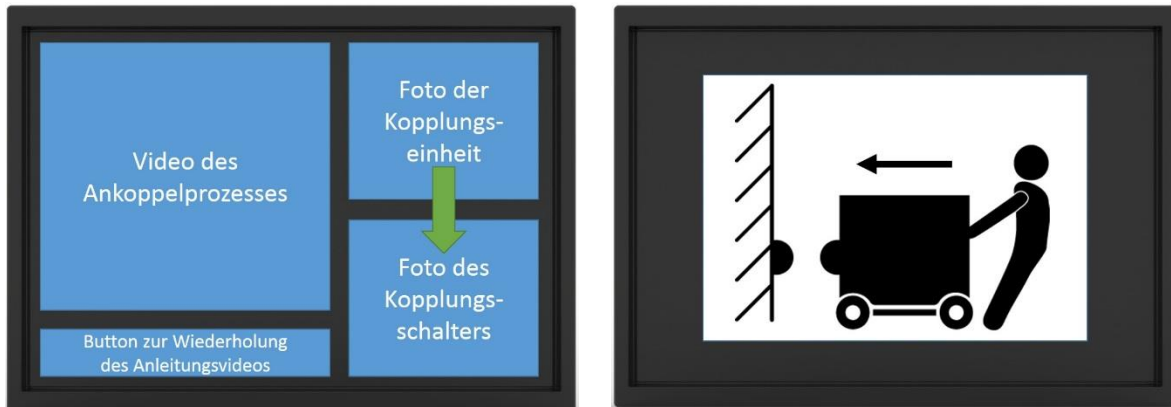


Abbildung 51: Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Ankoppelprozesses auf dem Touchscreen

### Anleitung des Verschiebeprozesses

Nachdem der Kommissionierwagen am Rahmengestell angekoppelt ist, wird der Verschiebeprozess des Rahmengestells bzw. die Navigation bis zum Entnahmeort für die ersten beiden Anleitungsstufen des Verschiebeprozesses sowohl über den Touchscreen als auch den regalseitigen Projektor angeleitet. In „Stufe I“ wird dabei neben einem Video auch ein Foto des Verschiebeprozesses auf dem Touchscreen dargestellt (siehe Abbildung 52, links). In „Stufe II“ wird auf dem Touchscreen lediglich ein Piktogramm des Verschiebeprozesses angezeigt (siehe Abbildung 52, rechts). In „Stufe III“ wird der Touchscreen nicht mehr eingesetzt.



Abbildung 52: Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Verschiebeprozesses auf dem Touchscreen

Zusätzlich dient die regalseitige Projektion von vier grünen Richtungspfeilen in allen drei Anleitungsstufen zur Navigation bis zum jeweiligen Entnahmeort (siehe Abbildung 53 und Abbildung 54). Sobald der entsprechende Entnahmeort erreicht ist, werden die Richtungspfeile des Verschiebeprozesses durch das jeweilige Anleitungselement des Entnahmevorgangs abgelöst.

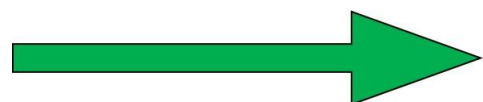


Abbildung 53: Richtungspfeil des Verschiebeprozesses



Abbildung 54: Navigation des Verschiebeprozesses durch vier projizierte Richtungspfeile

### **Anzeige von Entnahmeort, -menge und -einheit**










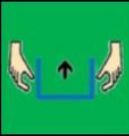




In „Stufe I“ des Entnahmeprozesses werden sowohl der Touchscreen als auch der regalseitige Projektor eingesetzt. Dabei werden auf dem Touchscreen in gleicher Ausführung wie beim Verschiebeprozess (siehe

Abbildung 52, links) ein Video sowie eine Fotografie des Entnahmeprozesses sowie zusätzlich die zu entnehmende Stückzahl angezeigt. Für die beiden nachfolgenden Anleitungsstufen hingegen kommt der Touchscreen nicht mehr zum Einsatz und es werden allein projizierte Lichtsignale eingesetzt. Diese Anleitungselemente unterscheiden sich zwischen einer Ausführung für die Einzelteil- und einer für die Gesamtbehälterentnahme (siehe Tabelle 14). Ein einzelnes Anleitungselement besteht dabei als Grundelement aus einem rechteckigen grünen Lichtbalken, welcher je nach Anleitungsstufe zusätzliche Informationen enthält und zur Anzeige des Entnahmeortes direkt vor diesem in blinkender Ausführung auf den jeweiligen Projektionswinkel projiziert wird.

Bei der niedrigsten Anleitungsstufe („Stufe I“) wird der grüne Lichtbalken in drei Segmente unterteilt. Dabei enthält das linke Segment eine Fotografie des auszuübenden Entnahmeprozesses, das mittlere Segment die Anzahl (in arabischen Ziffern) der zu entnehmenden Artikel bzw. KLTs (Entnahmemenge) und das rechte Segment eine Fotografie des zu entnehmenden Artikels bzw. KLTs (Entnahmeeinheit). Bei der mittleren Anleitungsstufe („Stufe II“) werden die Fotografien der auszuübenden Entnahmeprozesse jeweils durch die speziell entwickelten und evaluierten Piktogramme ersetzt.

Bei der höchsten Anleitungsstufe („Stufe III“) werden weder Darstellungen des Entnahmeprozesses noch der zu entnehmenden Artikel bzw. KLTs abgebildet. Das Anleitungselement besteht allein aus dem grünen Lichtbalken und der mittig dargestellten Anzahl der zu entnehmenden Artikel bzw. KLTs. In dieser Anleitungsstufe kann davon ausgegangen werden, dass die Kommissionierer die Unterscheidung der verschiedenen Regalebenen für die Einzelteil- oder Gesamtbehälterentnahme beherrschen und somit die angezeigten Zahlen zielgerichtet interpretiert werden.

Tabelle 14: Anleitungsformen für die gegenseitige Projektion des Entnahmevorgangs

	Einzelteilentnahme	Gesamtbehälterentnahme
„Stufe I“	  	  
„Stufe II“	  	  
„Stufe III“		

#### Anzeige des Ablageortes auf der Waage

Die Anleitung des Ablege- und Positionierungsprozesses auf der Waage erfolgt in „Stufe I“ und „Stufe II“ sowohl über den Touchscreen als auch über Projektion. Dabei werden auf dem Touchscreen in „Stufe I“ ein Video und eine Fotografie (siehe Abbildung 55, links) und in „Stufe II“ ein Piktogramm (siehe Abbildung 55, rechts) angezeigt.



Abbildung 55: Darstellung der „Stufe I“ (links) und „Stufe II“ (rechts) der Anleitung des Wiegeprozesses auf dem Touchscreen

Die Anzeige des Ablageortes auf der Waage wird über Anleitungselemente umgesetzt, welche direkt auf die Waagenplattform projiziert werden. Bei der Darstellung der projizierten Anleitungen wird in diesem Fall nicht zwischen „Stufe I“ und „Stufe II“ unterschieden. Sie besteht in beiden Fällen aus projizierten Ecken, welche als Positionierungshilfe auf die Kantenanschlüsse projiziert werden. Dabei



werden je nachdem, welcher KLT-Typ (3147 oder 4147) im Einsatz ist, entweder die äußeren oder die inneren Eckanschlüsse angeleuchtet.

In „Stufe III“ hingegen wird keine Prozessinformation mehr angezeigt, da in diesem Modus davon ausgegangen werden kann, dass eine zusätzliche Anleitung des Wiegeprozesses nicht erforderlich ist. Nachdem auf dem Touchscreen eine positive Rückmeldung für den Wiegeprozess (erscheint für alle drei Anleitungsstufen) erfolgte, muss der auf der Waage vorhandene KLT aufgenommen und an entsprechender Stelle auf dem Kommissionierwagen abgelegt werden.

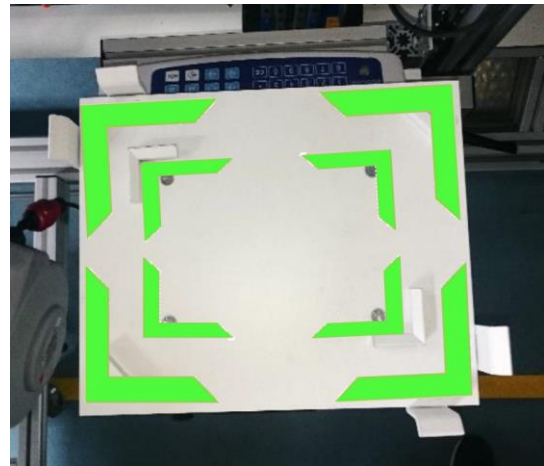


Abbildung 56: Lichtsignale der projizierten Eckleisten als Positionierungshilfe für den Wiegeprozess

### **Anzeige des Ablageortes auf dem Kommissionierwagen**

In „Stufe I“ des Ablegevorgangs werden sowohl der Touchscreen als auch der wagenseitige Projektor eingesetzt. Dabei werden auf dem Touchscreen in gleicher Ausführung wie beim Verschiebe- und Entnahmeprozess (siehe

Abbildung 52, links) ein Video sowie eine Fotografie des Ablegeprozesses angezeigt. Die beiden nachfolgenden Anleitungsstufen hingegen basieren allein auf dem Einsatz eines rechteckigen und grün blinkenden Lichtsignals, welches an der jeweiligen Ablageposition direkt auf den Projektionswinkel projiziert wird und in identischer Ausführung für alle drei Anleitungsstufen eingesetzt wird (siehe Abbildung 57, links).

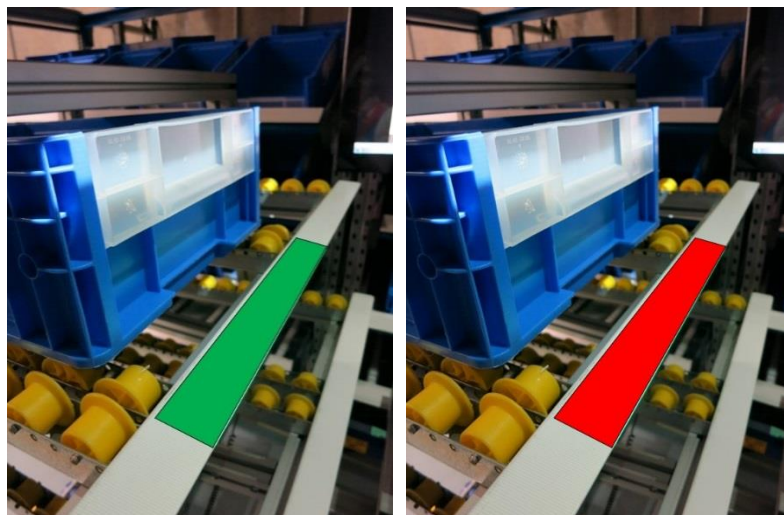


Abbildung 57: Grün blinkendes Lichtsignal zur Anzeige des Ablageortes (links), Rot blinkendes Lichtsignal als Fehlerrückmeldung (rechts), jeweils für alle drei Anleitungsstufen

### **Fehlerrückmeldung**

Bei Bedarf einer Fehlerrückmeldung z.B. bei einem fehlerhaften Entnahme- oder Ablegevorgang wird am entsprechenden Fehlerort ein auf den Projektionswinkel projiziertes rechteckiges und rot blinkendes Lichtsignal angezeigt (siehe Abbildung 57, rechts). Parallel dazu wird am richtigen Entnahme- oder Ablageort der entsprechende Anleitungsschritt angezeigt (siehe Abbildung 57, links).

## 7 Aufbau und Realisierung eines Prototyps

Nachdem – wie in den vorhergehenden Kapiteln dargelegt – die wichtigsten technischen Funktionselemente vorgestellt, für diese eine Nutzwertanalyse durchgeführt, Angebote eingeholt und ein kaufmännischer Vergleich erstellt wurde, erfolgten die Auswahl und Bestellung der einzelnen Systemkomponenten. Im Anschluss an die Auswahl wird das gesamte System in der Laborumgebung konstruiert, gefertigt, montiert und aufgebaut. Im Zuge der Konstruktion werden die einzelnen Elemente mit der CAD-Software „PTC Creo 2.0/3.0“ modelliert und im bereits bestehenden CAD-Modell ergänzt.

### 7.1 Systemübersicht und Aufbau

*Zur Veranschaulichung der Hauptbestandteile sind in*

Abbildung 58 alle hardwareseitig bedeutenden Funktionseinheiten und Baugruppen des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse abgebildet. Die zwei Einheiten des **Durchlaufregallagers** sowie der **Kommissionierwagen** stellen die Kernelemente des Gesamtaufbaus dar. Zusätzlich sind eine exemplarische **Assistenzeinheit**, bestehend aus dem ausgewählten Projektor (Funktionseinheit zur visuellen Informationsbereitstellung, siehe Kap. 6.2.1) und dem Tiefensensor (Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle von Entnahme- und Ablageprozessen, siehe Kap. 6.2.2), der **Touchscreen** mit Schwenkarm (zusätzliche Funktionseinheit zur visuellen Informationsbereitstellung, siehe Kap. 6.4.6) sowie die höhenverstellbare **Waageneinheit** mit -plattform (Funktionseinheit zur automatischen Kontrolle der Menge und Identität, siehe Kap. 6.2.3) abgebildet. Als vierte Komponente ist das verschiebbare **Rahmengestell** (siehe Kap. 6.4.1) zur Verbindung des Kommissionierwagens mit dem Durchlaufregallager und als Schnittstelle zur Befestigung der einzelnen Funktionseinheiten dargestellt.

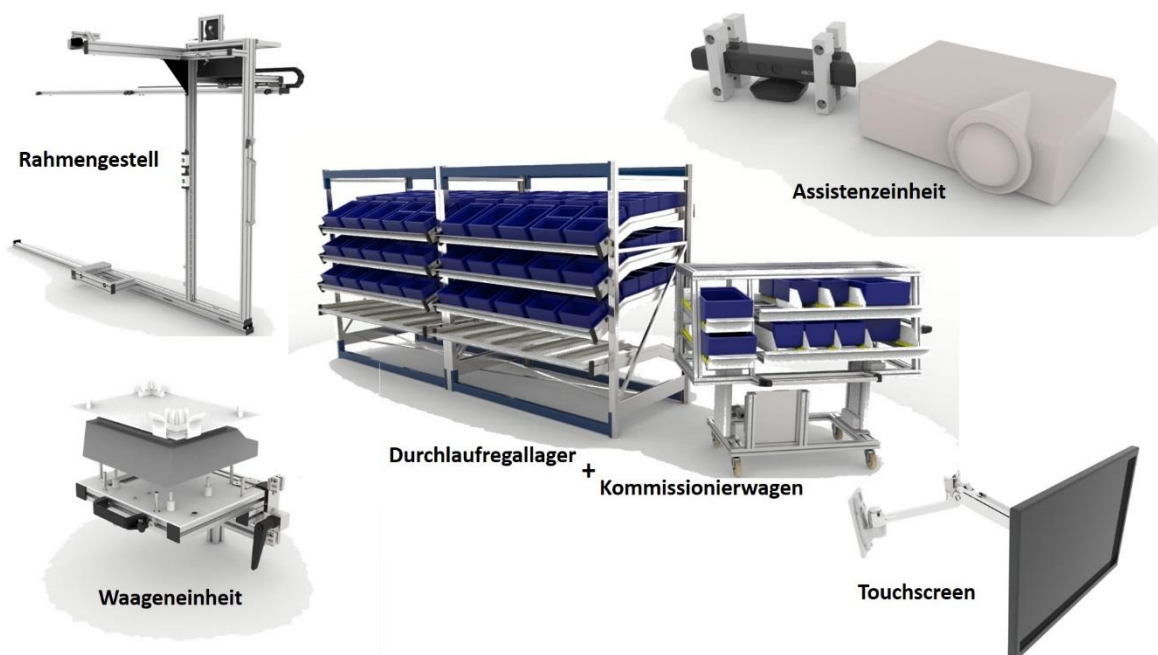


Abbildung 58: Übersicht der wichtigsten Baugruppen und Funktionseinheiten des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse



Der Aufbau des Kommissioniersystems und die Befestigung der einzelnen Elemente erfolgt allein mit lösbaren Schraubenverbindungen.

Als exemplarischer Auszug des Lageraufbaus der WfbM wurden die zwei Einheiten des Durchlaufregallagers schon zu einem früheren Zeitpunkt beschafft und in der Laborumgebung installiert (siehe Kap. 6.1). In Ergänzung werden in einem weiteren Schritt des Aufbaus die Linearführungen auf dem Boden und auf dem Regal fixiert. Anschließend wird das Rahmengestell aus Aluminium aufgebaut sowie daran das Wegmesssystem ausgerichtet und die Kopplungseinheit befestigt. Anschließend werden die zwei Kinects, Projektoren und Rechneinheiten sowie die Waage und der Touchscreen installiert. Zusätzlich wird die Energieführungskette zur sicheren und geordneten Mitführung der einzelnen elektrischen Kabel verlegt und befestigt (siehe Abbildung 59).

Der fertige Gesamtaufbau des Assistenzsystems für leistungsgeminderte Mitarbeiter in manuellen Kommissionierprozessen umfasst somit hardwareseitig drei Hauptkomponenten:

- a. Den eigenentwickelten und bereits bestehenden Kommissionierwagen,
- b. das Durchlaufregallager bestehend aus zwei Einheiten und
- c. das verschiebbare Rahmengestell mit den beiden Assistenzeinheiten und den weiteren daran befestigten Bestandteilen (siehe Abbildung 59).

Im Anschluss an den hardwareseitigen Aufbau findet die Inbetriebnahme des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse statt. Hierfür werden alle Teilkomponenten wie z.B. Linearführungen, Wegmesssystem, Kinects und Projektoren auf ihre Funktionen überprüft und justiert.

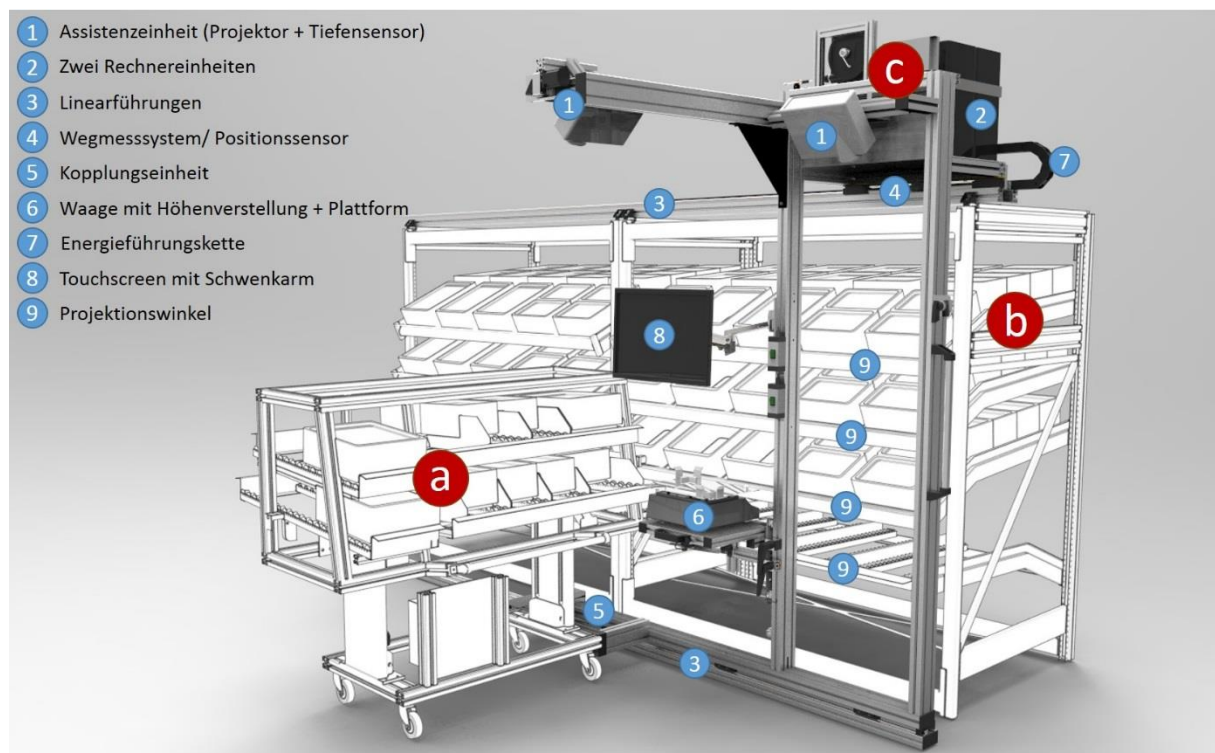


Abbildung 59: Hardwareaufbau mit allen wichtigen Bestandteilen des Assistenzsystems für Kommissionierprozesse

## 7.2 Funktionsweise und Prozessablauf

Der Ablauf eines Kommissionierprozesses basiert auf den in Kapitel 6.1 ermittelten Kernprozessen der manuellen Kommissionierung und dem in Kapitel 6.5.2 entwickelten Funktionsmodell der Informationsübertragung. Unter Einsatz der im vorhergehenden Kapitel vorgestellten und in Betrieb

genommenen Hardware sowie der in Kapitel 6.5.4 dargestellten Anleitung verläuft ein Kommissionierablauf folgendermaßen:

In einem ersten Schritt wird der Kommissionierwagen quer zum Regal gestellt und mit dem beweglichen Rahmengestell gekoppelt (Anleitung per Touchscreen). Um die Zusammenstellung eines Auftrags zu starten, wird danach am Touchscreen ein Kommissionierauftrag ausgewählt. Anschließend erfolgt die Navigation bis zum Entnahmeort über vier projizierte Richtungspfeile und eine zusätzliche Anleitung per Touchscreen. Sobald der entsprechende Entnahmeort erreicht wird (Kontrolle der Soll- und Ist-Position über das Wegmesssystem), verschwinden die Richtungspfeile. Auf den Projektionswinkeln vor dem entsprechenden Entnahmeort wird zur Lokalisierung ein blinkendes Anleitungselement projiziert. Dieses beinhaltet zusätzliche Informationen zum auszuübenden Entnahmevorgang, zur Entnahmemenge sowie zur Entnahmeeinheit. Wenn der Entnahmezugriff des Kommissionierers an der korrekten Position erfolgte (automatische Kontrolle über regalseitig befestigten Tiefensensor), wird in einem zweiten projizierten Anleitungsschritt der Ablageort (für die Platzierung des Behälters oder der Einzelteile) auf der Waage grün angeleuchtet und auf dem Touchscreen die Anleitung für den Wiegeprozess dargestellt. Sobald die Waage die korrekte Entnahmemenge registriert hat, wird der Ablageort auf dem Kommissionierwagen über ein weiteres projiziertes und grün blinkendes Anleitungselement auf den wagenseitigen Projektionswinkeln signalisiert (siehe Abbildung 60). Nachdem eine Auftragsposition korrekt kommissioniert wurde (automatische Kontrolle über wagenseitig befestigten Tiefensensor), wird die Kommissionierung der nachfolgenden Auftragsposition erneut über die projizierten Richtungspfeile angeleitet und der Kommissionierwagen mitsamt dem verschiebbaren Rahmengestell zum nachfolgenden Entnahmeort weitergeschoben und die Anleitungschronologie beginnt von vorne.



Abbildung 60: Projizierte Lichtsignale zur Anleitung der Verschiebe-, Entnahme- und Ablageprozesse

## 8 Vorbereitung, Aufbau und Durchführung der Evaluierungen

In der letzten Phase des nutzerzentrierten Entwicklungsprozesses – im Anschluss an die hard- und softwareseitige Realisierung – wird der Prototyp des Assistenzsystems in drei Evaluationszyklen (siehe Kap. 9.2.1, Kap. 9.2.2 und Kap. 9.3) mit unterschiedlichen Nutzergruppen empirisch untersucht (siehe Kap. 2.5).

Das vorliegende Kapitel verdeutlicht, wie das Assistenzsystem in einer Laborumgebung im Vergleich mit drei weiteren Anleitungssystemen für manuelle Kommissionierprozesse empirisch evaluiert wird. Hierfür wird in diesem Kapitel auf die Vorbereitung, den Versuchsaufbau und die Durchführung der Evaluierungen detailliert eingegangen.

### 8.1 Vorbereitung der Evaluierungen

Im Folgenden werden die methodische Vorgehensweise und das Studiendesign erläutert. Zusätzliche Berücksichtigung finden hierbei die Evaluationskriterien und die daraus abgeleiteten Ziele. Abschließend werden grundlegende Aspekte, die im Kontext von Evaluierungen mit Menschen mit Behinderung beachtet werden müssen, die dafür benötigten Messwerkzeuge wie Fragebögen und Datenblätter sowie die Umsetzung forschungsethischer Prinzipien vorgestellt.

#### 8.1.1 Methodische Vorgehensweise

Zu Beginn der Studienplanung muss entschieden werden, in welcher Messumgebung – im Feld oder im Labor – die Untersuchung stattfinden soll (vgl. Bortz und Döring 2009).

**Felduntersuchungen** finden durch ihre Praxisnähe in einer möglichst unbeeinflussten und natürlichen Umgebung statt, in diesem Fall z.B. in einem Logistiklager einer WfbM. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse eine „unverfälschte Realität“ widerspiegeln und eine hohe externe Validität<sup>20</sup> aufweisen. Bei dieser praxisnahen Datenerhebung ist der Vorbereitungs-, Durchführungs- und Kostenaufwand sehr hoch. Gleichzeitig sind die gewonnenen Daten vor allem im Bereich der Kommissionierung oft nur schwer vergleichbar bzw. mit einer eher niedrigen externen Validität verbunden (vgl. Reif 2009).

In **Laboruntersuchungen** hingegen lassen sich untersuchungsbedingte Störgrößen, die potenziell die abhängigen Variablen beeinflussen können, kontrollieren. Diese Untersuchungen finden daher in „laborähnlichen“ Räumen statt, wodurch der Versuchsleiter Veränderungen des Umfelds kontrollieren und somit eine hohe interne Validität<sup>21</sup> erreichen kann.

Kommissionierprozesse in Laborumgebung konzentrieren sich in der Regel auf die wesentlichen Kernprozesse wie die Identifikation, Entnahme und Ablage. Der fast vollständige Wegfall der Wegzeiten und sonstigen Tätigkeiten mit geringer mentaler Anforderung (z.B. Leerbehälterhandhabung, Entfernen von Verpackungen) führt durch die stetig hohe Konzentrationsleistung zu einer höheren mentalen Belastung als in der Praxis üblich (vgl. Lolling 2003). Im Zuge der iterativen Evaluation von technischen Entwicklungen ist es meist unabdingbar, vor einer Felduntersuchung eine entsprechende Laboruntersuchung durchzuführen. Nur so ist es möglich, versteckte Probleme oder Fehler aufzudecken, die benötigte Zeit abzuschätzen und einen routinierten Arbeitsablauf sicherzustellen, um den alltäglichen Arbeitsbetrieb während der Felduntersuchung nicht zu hemmen.

---

<sup>20</sup> Mit externer Validität wird die Generalisierbarkeit der gefundenen Ergebnisse auf andere Untersuchungssituationen, Versuchspersonen oder -zeitpunkte bezeichnet (vgl. Bortz und Döring 2009).

<sup>21</sup> Die interne Validität gibt an, ob die Messwerte der abhängigen Variablen eindeutig auf den Einfluss der unabhängigen Variablen zurückzuführen sind (vgl. Bortz und Döring 2009).

Die drei nachfolgenden Studien wurden als Laboruntersuchungen durchgeführt, wobei der anwendungsorientierte Versuchsaufbau (siehe Kap. 8.2) einen hohen Praxisbezug bietet. Neben einer hohen internen Validität wird somit versucht, eine verhältnismäßig hohe externe Validität zu erreichen.

Zusätzlich zur Auswahl des Studenumfeldes muss entschieden werden, ob die Untersuchungskriterien in einem quasiexperimentellen oder experimentellen Untersuchungssetting geprüft werden (vgl. Bortz und Döring 2009).

Die **quasiexperimentelle** Untersuchung vergleicht „natürliche“, d.h. bereits vorhandene Gruppen. Eine **experimentelle** Untersuchung hingegen vergleicht eigens nach dem Zufallsprinzip zusammengestellte Gruppen. In quasiexperimentellen Anordnungen mit natürlichen Gruppen können sich die Gruppen hinsichtlich der unabhängigen Variablen (siehe Kap. 8.1.2), aber auch hinsichtlich weiterer Variablen wie z.B. der Kommissioniererfahrung, des Geschlechts oder des Alters unterscheiden. In einer experimentellen Anordnung können diese Unterschiede durch eine zufällige Aufteilung der Untersuchungsteilnehmer minimiert werden. Eine solche Randomisierung basiert auf dem Prinzip des statistischen Fehlerausgleichs, was wiederum bedeutet, dass es bei einer ausreichenden Gruppengröße zu einer Aufhebung der personenbezogenen Störvariablen kommt (vgl. Bortz und Döring 2009).

Die in Kapitel 9.2.1, 9.2.2 und 9.3 beschriebenen Evaluierungen basieren auf einem experimentellen Untersuchungssetting mit einer Randomisierung der Untersuchungsteilnehmer auf die Reihenfolge der eingesetzten Kommissionierverfahren. Des Weiteren muss die geeignete Evaluationsform ausgewählt werden.

Im Bereich der Evaluation der Gebrauchstauglichkeit (Usability) lassen sich zwei wesentliche Unterscheidungskriterien identifizieren: Zum einen der *Zeitpunkt* der Untersuchung und zum anderen die Art der *Gutachter*.

Je nach Zeitpunkt unterscheidet man die formative und die summative Evaluation.

Bei der **formativen** Evaluation finden frühzeitig und entwicklungsbegleitend qualitative Untersuchungen statt. Dabei werden z.B. verbale Aussagen und Beobachtungen erhoben, um Probleme und Schwächen zu identifizieren bzw. Lösungsansätze daraus ableiten zu können. Als Verfahren eignen sich beispielsweise Usability-Tests<sup>22</sup> (vgl. Machate und Burmester 2003).

Die **summative** Evaluation erfolgt hingegen nach Abschluss der Produktentwicklung, um eine Gesamteinschätzung des Untersuchungsgegenstandes zu erhalten (vgl. Schweibenz und Thissen 2003). Dabei werden primär quantitative Daten wie z.B. die Durchführungszeit und Fehleranzahl erhoben. Der Vorteil dieser Kennzahlen ist die objektive Messbarkeit (siehe Kap. 8.1.3). Als Methoden eignen sich hierfür z.B. Fragebögen. Teilweise werden zu den quantitativen, zusätzlich auch qualitative Daten erfasst.

Als weiteres Unterscheidungsmerkmal für die Usability-Evaluation wird je nach Gutachter zwischen der experten- und der benutzerorientierten Methode unterschieden.

Bei der **expertenorientierten** bzw. analytischen Methode werden Experten als „Ersatz-Nutzer“ für die Evaluation herangezogen. Der Untersuchungsgegenstand wird dabei mit Hilfe vorgegebener

---

<sup>22</sup> Bei einem Usability-Test überprüft ein potenzieller Nutzer ein Entwicklungsergebnis im Rahmen einer abschließenden Validierung, um Schwächen und Probleme, aber auch positive Aspekte des Systems / der Hardware aufzudecken. Die Daten dieses empirischen Verfahrens werden mit Hilfe von Fragebogen- und Interviewmethoden erfasst. Es ist von Bedeutung, dass die ausgewählten Nutzer repräsentativ für die spätere Nutzergruppe sind (vgl. Zühlke 2012; Use Tree - Berliner Kompetenzzentrum für Usability-Maßnahmen 2014).

Richtlinien und anhand der Expertenerfahrungen auf mögliche Probleme und Schwächen der Gebrauchstauglichkeit untersucht (vgl. Heuer 2003). Als Methode für die expertenorientierte Evaluation wird häufig die Heuristische Evaluation<sup>23</sup> eingesetzt.

Bei der **benutzerorientierten** bzw. empirischen Methode hingegen testen künftige bzw. reale Nutzer einen Untersuchungsgegenstand (vgl. Schweibenz und Thissen 2003). Die erfassten Daten und Beobachtungen ermöglichen Rückschlüsse über die Stärken und Schwächen der untersuchten Systeme (vgl. Heuer 2003). Typische Methoden, die für eine benutzerorientierte Evaluation eingesetzt werden, sind unter anderem Fragebögen und Usability-Tests.

### 8.1.2 Studiendesign

Im Kontext der empirischen Forschung wird zwischen **abhängigen** und **unabhängigen Variablen** unterschieden. Die abhängige Variable stellt eine Messgröße dar, die von der Wirkung der unabhängigen Variable und von Störeinflüssen abhängt. Die unabhängige Variable hingegen wird als experimentelle Bedingung vom Untersuchungsleiter eingeführt und ihr Einfluss auf die abhängige Variable untersucht (vgl. Bortz und Döring 2009).

In den nachfolgenden drei Evaluierungen stellt die Art des Anleitungssystems die unabhängige Variable dar. Dies sind in den ersten beiden Untersuchungen (siehe Kap. 9.2.1 und Kap. 9.2.2) die Kommissioniererführung durch Pick-by-Paper, -Light, -Display und -Projection. In der abschließenden Evaluierung (siehe Kap. 9.3) wird Pick-by-Display durch Pick-by-Voice als Informationsbereitstellung ersetzt (siehe Kap. 9.2.3).

Aufgrund der Untersuchung von nur einer unabhängigen Variablen ergibt sich ein einfaktorielles Versuchsdesign mit vier Faktorstufen (Anleitungssystemen). Die abhängigen Variablen Kommissionierzeit, -fehlerrate und subjektive Beanspruchung (siehe Kap. 8.1.3) werden in einem multivariaten Design (Analyse mit mehr als zwei abhängigen Variablen) erfasst.

Des Weiteren muss im Zuge des Studiendesigns festgelegt werden, in welcher Form die Messwiederholungen durchgeführt werden. Es wird zwischen einem **within-subjects-design** (auch als Repeated-measures-Design bezeichnet) und einem **between-subjects-design** unterschieden. Im within-subjects-design testen alle Versuchsteilnehmer alle Untersuchungsbedingungen (im vorliegenden Fall die vier Anleitungssysteme). Im between-subjects-design hingegen wird pro Versuchsteilnehmer nur eine Untersuchungsbedingung bzw. ein Anleitungssystem getestet (vgl. Bröder 2010).

In der vorliegenden Arbeit wird ein within-subjects-design ausgewählt (siehe Abbildung 61), d.h. jeder Versuchsteilnehmer testet alle vier Anleitungssysteme der Kommissionierung.

<b>Anzahl der abhängigen Variablen (Zielvariablen)</b>	Univariat (Eine AV)	Multivariat (Mehrere AV)
<b>Anzahl der unabhängigen Variablen (Faktoren)</b>	Einfaktoriell Faktorstufen 1,2,...,n	Mehrfaktoriell A x B - Design
<b>Messwiederholung</b>	Between-subjects	Within-subjects

Abbildung 61: Auswahl des Studiendesigns

<sup>23</sup> Bei dieser analytischen Methode, die in der frühen Phase der Entwicklung eines Untersuchungsgegenstandes eingesetzt wird, untersuchen mehrere Experten – stellvertretend für die realen Endnutzer – einen Prototyp auf Schwächen und Fehler. Der Vorteil dieser Methode ist die schnelle Durchführbarkeit und der geringe Aufwand, da innerhalb eines kurzen Zeitraums und mit einer geringen Expertenanzahl ein Großteil der Probleme und Schwachstellen eines Untersuchungsgegenstands aufgedeckt werden können (vgl. Cheval).

Diese Vorgehensweise führt zu abhängigen (verbundenen) Stichproben, deren Objekte jeweils in Vierergruppen einander zugeordnet sind (vgl. Günthner et al. 2009; Bortz und Schuster 2010). Bei beispielsweise zehn Versuchsteilnehmern mit je vier Versuchsdurchläufen (Pick-by-Paper, -Light, -Display, -Projection) ergeben sich somit zehn abhängige Vierergruppen für z.B. die Kommissionierzeiten.

Von großer Bedeutung ist hierbei die Variation der Reihenfolge, in der ein Versuchsteilnehmer die verschiedenen Anleitungssysteme durchläuft, um Störeinflüsse z.B. durch Lerneffekte zu vermeiden. Dies geschieht durch eine Randomisierung der einzelnen Anleitungssysteme nach dem lateinischen Quadrat (Latin Square Design) (vgl. Baumann 2013; Bortz und Schuster 2010). Bei vier Anleitungssystemen ergibt die Anzahl der Permutationen von  $n=4$  nach folgender Formel

$$n! = 4 * 3 * 2 * 1 = 24$$

24 verschiedene Systemreihenfolgen. Daraus ergibt sich wiederum eine Anzahl von mindestens 24 Versuchsteilnehmern, welchen jeweils eine Systemreihenfolge zufällig zugeordnet wird (siehe Abbildung 62). Mit dieser Einteilung soll verhindert werden, dass ein Trend oder eine unerkannte Änderung die Ergebnisse der Evaluierung verfälscht (vgl. Kleppmann 2013). Zudem werden mit 24 Versuchsteilnehmern durch die Usability-Tests (Vorstudien) die meisten Fehler und Probleme aufgedeckt. Denn nach Faulkner werden bereits mit 20 Versuchsteilnehmern mindestens 95 % und durchschnittlich sogar 98,4 % der Probleme ( $SD=1,61$ ) entdeckt (vgl. Faulkner 2003).

1. System	2. System	3. System	4. System	Reihenfolge	Teilnehmer
1	2	3	4	1234	1
		4	3	1243	2
	3	2	4	1324	3
		4	2	1342	4
	4	2	3	1423	5
		3	2	1432	6
2	1	3	4	2134	7
		4	3	2143	8
	3	1	4	2314	9
		4	1	2341	10
	4	1	3	2413	11
		3	1	2431	12
3	1	2	4	3124	13
		4	2	3142	14
	2	1	4	3214	15
		4	1	3241	16
	4	1	2	3412	17
		2	1	3421	18
4	1	2	3	4123	19
		3	2	4132	20
	2	1	3	4213	21
		3	1	4231	22
	3	1	2	4312	23
		2	1	4321	24

Verfahren	
1	pick-by-light
2	pick-by-paper
3	pick-by-projection
4	pick-by-display/pick-by-voice

Abbildung 62: Baumdiagramm der Systemreihenfolgen

Zur Sicherstellung der **Objektivität** des Versuchsdurchlaufs erfolgt die Kommissionierung systemübergreifend mit denselben Bauteilen. Trotzdem muss die Entnahmereihenfolge der Kommissionierung variieren, um einen Lerneffekt zu verhindern. Die Laufwege für den Kommissionierprozess müssen jedoch für alle vier Versuchsdurchläufe gleich bleiben.

Deshalb wird für jeden Versuchsdurchlauf eine Reihenfolge mit definiertem Start- und Endpunkt festgelegt. Die Start- und Endposition ist über Bodenmarkierungen gekennzeichnet, wo zu Beginn der Kommissionierwagen bereitsteht.

Vier Wochen vor der ersten Studie werden die vier Systeme (insbesondere das neuentwickelte Pick-by-Projection-System) von drei Experten und einem leistungsgeminderten Mitarbeiter mit Kommissioniererfahrung in einer heuristischen Evaluation getestet und angepasst (siehe auch Kap. 8.3). Aufgrund der untergeordneten Bedeutung kann die Durchführung und Auswertung dieser Evaluierung in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet werden.

Die erste Vorstudie (siehe Kap. 9.2.1) findet über einen Zeitraum von drei Arbeitstagen, mit acht Versuchsteilnehmern pro Tag, als Usability-Test mit normal leistungsfähigen Menschen statt. Der Usability-Test ist eigentlich ein empirisches Verfahren, welches mit potenziellen Nutzern durchgeführt wird. Die vorliegende Arbeit stellt mit den leistungsgeminderten Menschen als potenziellen Nutzern einen Sonderfall dar, weshalb zwei Vorstudien durchgeführt werden. Das Verfahren wird in einem ersten Durchgang mit normal leistungsfähigen (siehe Kap. 9.2.1) und in einem zweiten Durchgang mit leistungsgeminderten Menschen (siehe Kap. 9.2.2) getestet.

Bei einer Durchführung ausschließlich mit der Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen bestünde die Gefahr, dass das gewonnene Feedback für die Wissenschaft und die weitere Entwicklung nicht ausreichend nachvollziehbar bzw. auswertbar ist. Zudem müssen bei der Durchführung von Untersuchungen mit dieser Nutzergruppe einige Besonderheiten beachtet werden (siehe auch Kap. 8.1.5 und Kap. 8.1.7). Mit Hilfe der Erfahrungen des ersten Usability-Tests lässt sich dieser Aufwand verringern.

Die zweite Vorstudie und die Hauptstudie finden ebenfalls über einen Zeitraum von drei Arbeitstagen als empirische Evaluation (Beurteilung durch reale Endnutzer) mit leistungsgeminderten Menschen statt (siehe Kap. 9.2.2 und Kap. 9.3). Pro Tag testen hierfür jeweils acht Versuchsteilnehmer die verschiedenen Verfahren zur Kommissionierführung. Um die vier Systeme zu testen, beträgt der Zeitbedarf pro Versuchsteilnehmer rund 60 Minuten. Im Anschluss an die beiden Vorstudien zur Gebrauchstauglichkeit werden Gestaltungs- und Optimierungspotenziale abgeleitet (siehe Kap. 9.2.3). Bei den beiden Vorstudien erfolgte die Versuchsdurchführung mittels der **Wizard-of-Oz**-Technik. Diese Methode vermittelt den Nutzern die Vorstellung, durch autark funktionierende Systeme angeleitet zu werden. Ein Mitglied aus dem Entwicklungs- oder Studententeam übernimmt dabei die Reaktionen der Systeme, ohne dass die Versuchsteilnehmer darüber informiert sind. Diese gehen somit davon aus, dass sie mit voll funktionsfähigen Systemen interagieren. Dieses Prinzip wird verwendet, um komplexe Anwendungen oder Systeme frühzeitig, kostengünstig und ohne großen Aufwand zu evaluieren (vgl. Dahlbäck et al. 1993).

Zur Betreuung und Ausführung der ersten Studie werden drei Mitarbeiter benötigt. Einer als „Wizard“ (zu Deutsch: Zauberer) zur Bedienung der Systeme, einer zur Erfassung der Zeiten und Fehler und einer zur Betreuung der Teilnehmer während der Einweisung, bei Fragen während der Versuchsdurchführung und beim Ausfüllen der Fragebögen. Da es sich bei den Versuchsteilnehmern der letzten beiden Studien um leistungsgeminderte Mitarbeiter handelt, wird dort für die Betreuung der „wartenden“ Versuchsteilnehmer eine weitere Person benötigt.

Der genaue Ablauf der einzelnen Studien mit einer Beschreibung der einheitlichen Vorgehensweise zur Erhebung der quantitativen und qualitativen Daten wird in den Kapiteln 9.2.1, 9.2.2 und 9.3 näher erläutert sowie in Abbildung 63 dargestellt.



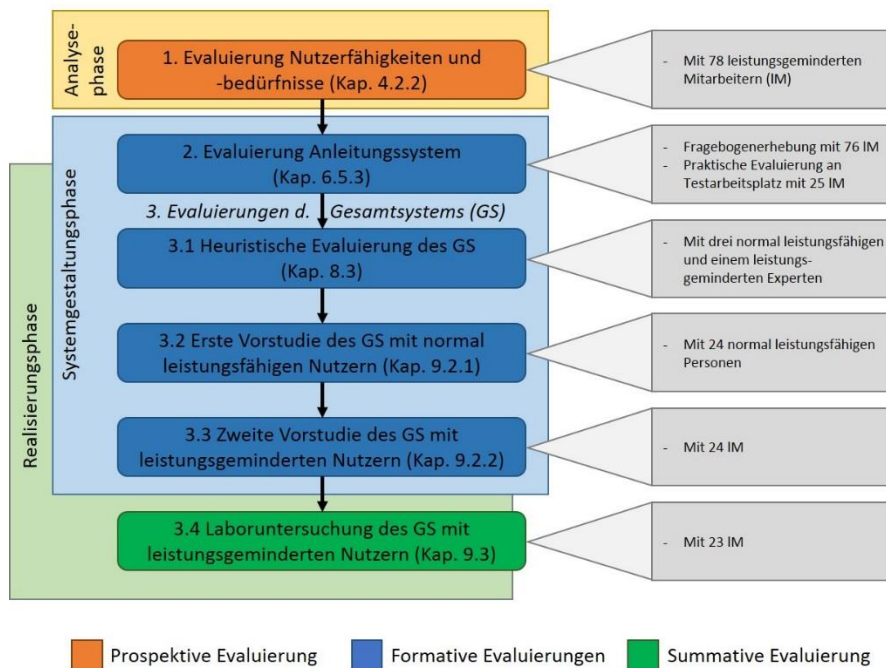


Abbildung 63: Evaluierungs- und Entwicklungsverlauf

### 8.1.3 Operationalisierung des Nutzens und Ableitung von Evaluationskriterien

Im Fachgebiet der Unterstützungssysteme gibt es bislang kein einheitliches Konzept zur Operationalisierung des Nutzens. Pataki et al. kombiniert deshalb das Konzept der Gebrauchstauglichkeit aus der Norm DIN EN ISO 9241-11 mit dem entscheidungsanalytischen Nutzenbegriff (vgl. Pataki et al. 2005). Dabei wird nach Jungermann et al. in der Entscheidungstheorie zwischen dem hedonistischen und dem instrumentellen Nutzen differenziert. In Anwendung auf den Nutzen von Unterstützungssystemen für Kommissionierprozesse stellt der hedonistische Nutzen die subjektiv empfundene Zufriedenheit der Benutzer mit dem jeweiligen System dar. Der instrumentelle Nutzen hingegen hängt davon ab, inwieweit das System die objektiv messbare Effektivität<sup>24</sup> und Effizienz<sup>25</sup> bei der Bewältigung der Kommissionieraufgabe erhöht (vgl. Jungermann et al. 2010; Pataki et al. 2005).

Der international geltende Standard der DIN EN ISO 9241 bündelt und bewertet in 29 Teilen das weltweit vorhandene Wissen zur ergonomischen Gestaltung von Soft-, Hardware und Arbeitsumgebung (vgl. Zühlke 2012). Teil 11 dieser Normenreihe beschreibt die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit und wird vor allem im Rahmen der nutzerzentrierten Entwicklung eingesetzt. Die Gebrauchstauglichkeit wird definiert als das „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (DIN EN ISO 9241-210, S. 11). Die Norm nennt zwar die Subkonstrukte Effektivität, Effizienz und Zufriedenstellung<sup>26</sup> sowie die Anforderungen, die die Messgrößen erfüllen sollen, beinhaltet jedoch keine konkreten Angaben zu deren Messung (vgl. Pataki et al. 2005).

<sup>24</sup> Effektivität: „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ (DIN EN ISO 9241-11).

<sup>25</sup> Effizienz: „Im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzter Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ (DIN EN ISO 9241-11).

<sup>26</sup> Zufriedenstellung: „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts“ (DIN EN ISO 9241-11).



Zur Messung der Attribute Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit gibt es jedoch eine Reihe verschiedener Vorschläge. Rubin und Nielsen beispielsweise führen die Erfolgs- und Fehlerrate, die Bearbeitungszeit sowie die subjektive Nutzerzufriedenheit über eine schriftliche und mündliche Befragung als Messgröße ein (vgl. Rubin 1994; Nielsen 1993, 2001).

Der Nutzen unterteilt sich in den nachfolgenden Erhebungen in die drei Subkonstrukte Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Deren Erhebung erfolgt mit Hilfe verschiedener Messmethoden, wobei sowohl Leistungsdaten als auch Nutzerurteile erfasst werden.

Nach Bevan und Pataki et al. wird bei Unterstützungssystemen die **Effektivität** der Aufgabenbewältigung über die Quantität und Qualität der erreichten Ziele bestimmt (vgl. Bevan 1995; Pataki et al. 2005). Im vorliegenden Fall ist jedoch die Quantität der durchzuführenden Kommissionierschritte bei allen Systemvarianten bereits in identischer Anzahl vorgegeben. Dies bedeutet, dass mit jeder Kommissioniertechnologie die gleiche Anzahl an Positionen kommissioniert wird und diese lediglich in der Reihenfolge variieren. Deshalb wird die Messung der Effektivität als Erfassung der Fehlerrate des Kommissionierprozesses umgesetzt.

Die **Effizienz** einer Systemnutzung hängt von den zur Erreichung des Ziels aufgewendeten „Kosten“ ab. Dies bedeutet, dass ein System umso effizienter ist, je weniger Ressourcen für seine Benutzung benötigt werden. Bei der Nutzung von Assistenzsystemen sind zwei Kostenfaktoren von Bedeutung, die auch zur Effizienzbestimmung von Kommissioniersystemen herangezogen werden können. Zum einen ist dies die Zeit, die benötigt wird, um Quantitäts- und Qualitätsziele zu erreichen (Zeitkosten) (vgl. Pataki et al. 2005). Den anderen Kostenfaktor bilden die aufgewendeten Ressourcen, das heißt die mentale Beanspruchung während der Nutzung der Systeme.

Die Zeitkosten werden über die Kommissionierzeiten der einzelnen Kommissionierverfahren ermittelt. Die mentale Beanspruchung im Bereich der Assistenzsysteme lässt sich hingegen vor allem über die subjektiven Nutzerurteile erheben, umgesetzt mit Hilfe der SEA-Skala<sup>27</sup> (vgl. Eilers et al. 1986) oder des NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index) (vgl. Hart und Staveland 1988; Hart 2006). Dieses mehrdimensionale Bewertungsinstrument eignet sich vor allem für nicht-körperliche Arbeit. Neben dem ursprünglichen Einsatzgebiet (Flugführungsaufgaben) wird der NASA-TLX auch zur Untersuchung von Suchtechniken für visuelle Informationen eingesetzt (vgl. Wiedenmaier 2004). Der Fragebogen besteht aus sechs unabhängigen zwanzigteiligen Skalen, welche verschiedene Beanspruchungsaspekte erfassen und zur Messung einer Gesamtbeanspruchung addiert werden können. Die sechs unterschiedlichen Dimensionen sind die geistige, körperliche und zeitliche Anforderung sowie Leistung, Anstrengung und Frustration. In der Kommissionierung sind die mentale, die physische und die zeitliche Beanspruchung gleichermaßen bedeutend, weshalb alle sechs Beanspruchungsaspekte gleich gewichtet werden. Der NASA-TLX eignet sich vor allem für die objektive Bewertung, da er keine hinreichende Sensitivität für geringere Aufgabenunterschiede aufweist.

---

<sup>27</sup> Die SEA-Skala (Skala zur Erfassung der subjektiv erlebten Anstrengung) ist eine metrische Skala von 110 mm Länge, auf der die Probanden ihre subjektiv erlebte mentale Beanspruchung bewerten, indem sie auf der Skalenlinie einen entsprechenden Wert – bezogen auf das Anstrengungslevel – ankreuzen. Diese Art eines standardisierten Messinstruments könnte jedoch für leistungsgeminderte Menschen aufgrund der erforderlichen Selbsteinschätzung mit einer frei anzukreuzenden Antwort eine Herausforderung darstellen. Literaturrecherchen zeigen, dass diese Personengruppe oftmals zur Meinungslosigkeit neigt (vgl. Goeke 2010) und eine Differenzierung von Antwortmöglichkeiten (aufgrund fehlender Reflexionsfähigkeit) nach eigenem Ermessen nicht möglich ist (vgl. Kubek 2012) (siehe Kap. 8.1.5). Aus diesen Gründen wird die SEA-Skala in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet, sondern der NASA-TLX als Messinstrument zur Erfassung der subjektiv erlebten mentalen Beanspruchung eingesetzt.

Daher beschränken sich seine Einsatzmöglichkeiten auf ein grobes Identifizieren von einzelnen Aspekten (vgl. Reif 2009).

Für die Messung der **Zufriedenheit** wird eine vergleichende Evaluation mit einer Priorisierung der Systeme durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Versuchsteilnehmer mit Hilfe eines Fragebogens die Systeme in eine Rangfolge bringen, wobei eine „1“ für das zufriedenstellendste und eine „4“ für das am wenigsten zufriedenstellende System verwendet wird (siehe Kap. 8.1.6).

In Abbildung 64 sind die Zusammenhänge der Gebrauchstauglichkeit bzw. des Nutzenkonzepts mit den drei Subkonstrukten sowie den dazugehörigen Operationalisierungen und Messvariablen für die Evaluierung von Kommissioniersystemen veranschaulicht.

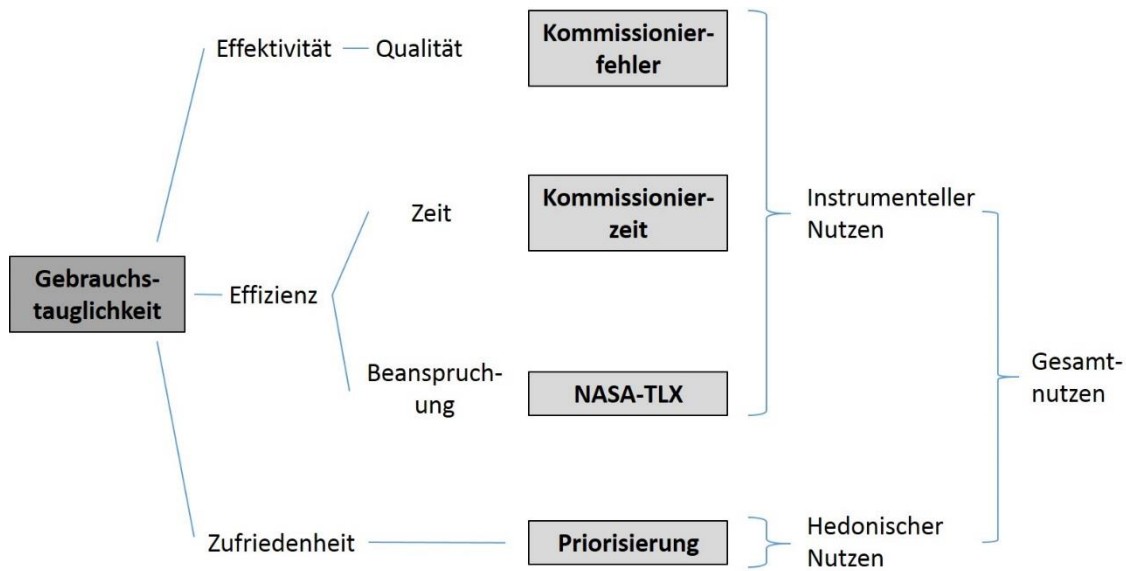


Abbildung 64: Zusammenhang zwischen der Gebrauchstauglichkeit, der Operationalisierung des Nutzens sowie den abgeleiteten Messvariablen für die Evaluierung von Kommissioniersystemen (vgl. Pataki et al. 2005)

Die dargestellte Methodik bietet aus der Perspektive der Mensch-Maschine-Interaktion einen neuen Ansatz zur konzeptgeleiteten und strukturierten Evaluation der Gebrauchstauglichkeit und des Nutzens von Assistenzsystemen in industriellen Prozessen, der auch für zukünftige Evaluationen in diesem Bereich eingesetzt werden kann.

In den vorliegenden Kapiteln wurden die Forschungsmethodik, das Studiendesign und die zu erhebenden Studieninhalte über die Evaluationskriterien bestimmt, entwickelt und ausgewählt, woraus sich die im folgenden Kapitel vorgestellten Evaluierungsziele ableiten lassen.

#### 8.1.4 Evaluierungsziele

Um das entwickelte Assistenzsystem auf seine Wirkung und seinen Nutzen hin zu evaluieren, werden die Grundprinzipien der statistischen Hypothesenprüfung eingesetzt. Die Erkundung und Überprüfung von Hypothesen zählt zu den Hauptaufgaben der empirischen Forschung. Für den vorliegenden Fall wird hierfür eine deduktive Vorgehensweise gewählt. Dies bedeutet, dass die formulierten Hypothesen den Ausgangspunkt der empirischen Untersuchung darstellen bzw. dass mit den empirischen Untersuchungen überprüft wird, inwieweit sich die aus Theorien, Voruntersuchungen oder aus persönlichen Überzeugungen abgeleiteten Hypothesen in der Realität bewähren (vgl. Bortz und Döring 2009).

Um die Evaluierungsziele zu überprüfen, wird der Einfluss der in Kapitel 8.1.2 bestimmten unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen mittels formulierter statistischer Hypothesen untersucht. Dazu werden Alternativhypothesen ( $H_1$ ) aufgestellt, welche einen Einfluss der

unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen behaupten. Eine Alternativhypothese ist dabei die eigentlich interessierende Forschungshypothese, welche meist einen neuen und „innovativen“ Effekt postuliert und diesen in Aussagen darstellt (vgl. Bortz und Döring 2009). Zusätzlich werden die dazugehörigen Nullhypothesen ( $H_0$ ) mit komplementären Aussagen zur Alternativhypothese in negierter Form formuliert und geprüft. Um im Anschluss an die Evaluierung die Hypothesen bewerten zu können, wird bereits vor Beginn der Durchführung ein Signifikanztest<sup>28</sup> und -niveau<sup>29</sup> festgelegt. Dies ist im vorliegenden Fall eine Varianzanalyse (auch als ANOVA bezeichnet, engl. **analysis of variance**) mit einer 5 %-Hürde für die Irrtumswahrscheinlichkeit. Dieses Niveau ist ein willkürlich festgelegter Wert, der im Forschungsbereich üblich ist. Von einem signifikanten Ergebnis spricht man, sobald ein Signifikanztest eine sehr niedrige Irrtumswahrscheinlichkeit (hier: kleiner als 5 %) ermittelt (vgl. Bortz und Döring 2009).

Für das vorliegende Assistenzsystem lässt sich basierend auf dem in Kapitel 2.5 vorgestellten Erkenntnisstand und den Untersuchungen von Reif, Baumann und Wölflé (vgl. Reif 2009; Baumann 2013; Wölflé 2014) zur Entwicklung von neuartigen Unterstützungstechnologien im manuellen Kommissionierbereich folgendes Ziel ableiten:

***Das neuentwickelte Assistenzsystem soll dem Nutzer bei der Ausführung von manuellen Kommissioniertätigkeiten durch eine nutzerzentrierte und zielgerichtete Unterstützung besser als die derzeit zur Verfügung stehende Vergleichstechnik assistieren.***

Um diese Aussage zu verifizieren, werden im Folgenden in Anlehnung an Reif (vgl. Reif 2009) die verschiedenen Hypothesen für die durchgeführten Evaluierungen vorgestellt. Es wird jeweils zuerst die Alternativ- und anschließend die Nullhypothese genannt.

Aufgrund theoretischer Überlegungen und Voruntersuchungen wird angenommen, dass die Art der Informationsbereitstellung einen Einfluss auf die Fehleranfälligkeit (*Kommissionierfehlerrate*) und Ausführungszeit (*Kommissionierzeit*) in der Kommissionierung haben könnte.

$H_{1,F}$ : Die Kommissionierfehlerrate ist abhängig von der Art der Informationsbereitstellung.

$H_{0,F}$ : Die Kommissionierfehlerrate ist bei allen vier Kommissionierverfahren unabhängig von der Informationsbereitstellung. Somit besteht bzgl. der Fehlerrate kein Unterschied zwischen den Kommissionierverfahren.

$H_{1,Z}$ : Die Kommissionierzeit ist abhängig von der Art der Informationsbereitstellung.

$H_{0,Z}$ : Die Kommissionierzeit ist bei allen vier Kommissionierverfahren unabhängig von der Informationsbereitstellung. Somit besteht bzgl. der Kommissionierzeit kein Unterschied zwischen den Kommissionierverfahren.

Das Aufsuchen und die Zuordnung der komplexen Lagerordnummern bei Pick-by-Paper und -Display bzw. -Voice könnte bei den Versuchsteilnehmern eine höhere *mentale Beanspruchung* (It. NASA-TLX) verursachen als die intuitiv verständlichen Anleitungen bei Pick-by-Projection und -Light.

---

<sup>28</sup> „Der Signifikanztest stellt [...] eine standardisierte statistische Methode dar, um auf der Basis von empirisch-quantitativen Stichprobendaten zu entscheiden, ob die Alternativhypothese anzunehmen ist oder nicht“ (Bortz und Döring 2009, S. 26).

<sup>29</sup> Ein Signifikanzniveau stellt die Obergrenze der Irrtumswahrscheinlichkeit dar, welche „ein Untersuchungsergebnis maximal aufweisen darf, damit die *Alternativhypothese* als bestätigt gelten kann“ (Bortz 1999, S. 754).

$H_{1,TLX}$ : Bei Pick-by-Projection und -Light ist die subjektiv erlebte mentale Beanspruchung niedriger als bei Pick-by-Paper und -Voice.

$H_{0,TLX}$ : Die subjektiv erlebte mentale Beanspruchung ist für alle vier Kommissionierverfahren gleich.

Der Grad der Unterstützung bei Entnahme und Ablage, die Intuitivität und die Gebrauchstauglichkeit wirken sich auf die Rangordnung bzw. *Priorisierung* der vier Kommissionierverfahren aus.

$H_{1,p}$ : Pick-by-Projection und -Light haben eine höhere Priorisierung als Pick-by-Paper und -Display bzw. -Voice.

$H_{0,p}$ : Bei den vier Kommissionierverfahren ist keine Priorisierung erkennbar.

Zur weiteren Vorbereitung der Evaluierungen wird im nachfolgenden Kapitel näher erläutert, was speziell bei Evaluierungen im Kontext von Menschen mit Behinderung beachtet werden muss.

### 8.1.5 Evaluierungen mit leistungsgeminderten Menschen

Die Zielgruppe der Menschen mit geistiger Behinderung unterscheidet sich von der meist in der Forschung betrachteten Personengruppe der normal leistungsfähigen Menschen in zahlreichen Aspekten (vgl. Terfloth und Janz 2009) (siehe Kap. 2.3). Aus diesem Grund werden nachfolgend die Besonderheiten und Herausforderungen, die in der Befragung und Durchführung von Evaluationen, aber auch in der Erstellung und Verwendung von Messinstrumenten wie Fragebögen oder Datenblätter zu beachten sind, wissenschaftlich analysiert und dargestellt.

Verschiedene Autoren verweisen auf erhebliche methodische Probleme bei der Befragung von Menschen mit geistiger Behinderung (vgl. Laga 1982; Wagner-Willi 2002; George 2008).

Die Herausforderungen bei wissenschaftlichen Erhebungen mit dieser Personengruppe lassen sich differenzieren in

- grundlegende Verständnisschwierigkeiten (vgl. Terfloth und Janz 2009),
- Ja-Sage-Tendenzen (vgl. Kubek 2012),
- eine geringe Aufmerksamkeitsspanne (vgl. Laga 1982),
- eine systematische Verzerrung des Antwortverhaltens (Phänomen der sozialen Erwünschtheit) (vgl. Schuppener 2005),
- ein Antwortverhalten mit Meinungslosigkeit oder gar Antwortverweigerung (vgl. Goeke 2010),
- Frage- und Interviewereffekte (vgl. Goeke 2010) sowie in
- eine Heterogenität hinsichtlich kognitiver, sensorischer und motorischer Leistungsfähigkeit (siehe Kap. 4.2).

Dem soll mit verschiedenen Maßnahmen begegnet werden.

Um den grundlegenden **Verständnisproblemen** zu begegnen, werden die Fragebögen und Studienunterlagen nach den Regeln für leichte Sprache<sup>30</sup> erstellt und von Experten auf Verständlichkeit begutachtet und ggf. angepasst (vgl. Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2014) (siehe Kap. 8.1.6). Zusätzlich ist während dem Ausfüllen der Fragebögen eine Betreuungsperson mit anwesend, die bei etwaigen Rückfragen oder Unklarheiten unterstützen konnte (siehe Kap. 8.1.2).

---

<sup>30</sup> „Die Begriffe „Leichte Sprache“ oder „Einfache Sprache“ bezeichnen eine sprachliche Ausdrucksweise, die besonders leicht verständlich ist. Sie soll vor allem Menschen mit geringen sprachlichen Fähigkeiten das Verständnis von Texten erleichtern“ (Caritas, S. 1).

Des Weiteren fanden die Evaluierungen mit den leistungsgeminderten Menschen in Begleitung und Anwesenheit eines pädagogischen und psychologischen Experten statt.

Über eine möglichst neutrale und einfache Fragestellung wurde versucht, die Ja-Sage-Tendenzen zu verringern. Ebenso wurde beim Verdacht eines **Ja-Sage-Trends** erneut nachgefragt, um nach Möglichkeit eine differenzierte Antwortgebung zu unterstützen. Dabei wurde versucht, die Individuen in ihrem Antwortverhalten in keinsten Weise zu lenken oder zu beeinflussen.

Buchner und Goeke verweisen auf die kurze Gesprächskonzentration von Menschen mit geistiger Behinderung, weshalb für die Befragung der Teilnehmenden ein eher kurzer Zeitrahmen von ca. 20 Minuten anberaumt wurde (vgl. Buchner 2008; Goeke 2010). Bei einer längeren **Befragungsdauer** kann eine nachlassende Aufmerksamkeit oder ein Kommunikationsrückzug beobachtet werden.

In den nachfolgend beschriebenen Evaluierungen haben die jeweiligen Zeiten für das Ausfüllen der Fragebögen nach einem Systemtest nie länger als fünf bis zehn Minuten gedauert. Die Dauer konnte jedoch in Abhängigkeit von Tagesform und Charakter sowie der damit zusammenhängenden Gesprächigkeit schwanken.

Das Phänomen einer systematischen **Verzerrung des Antwortverhaltens** tritt laut Goeke in allen Personenkreisen auf, verstärkt sich jedoch bei Menschen mit geistiger Behinderung. Da sich diese Personengruppe in Abhängigkeitsverhältnissen befindet und daher befürchtet, dass ihre Aussagen oder ihr Verhalten in Befragungen Konsequenzen haben könnte, ist dieses Phänomen verstärkt zu beobachten (vgl. Goeke 2010). Zudem weisen laut Schuppener diese Menschen eine Tendenz für „erwartete Antworten“ auf, um sich dadurch eine direkte Art der Zuwendung oder Anerkennung zu sichern (vgl. Schuppener 2005). Diesem Verhalten wurde durch dieselben Maßnahmen wie bei der Ja-Sage-Tendenz begegnet. Durch die mehrfache Zusicherung der vollständigen Anonymität sollte dieser Effekt ebenfalls verringert werden.

Auch das Phänomen der **Meinungslosigkeit und Antwortverweigerung** lässt sich oft auf Unverständnis auf Seiten der Befragten sowie auf spezifisches Verhalten des Erhebungspersonals zurückführen. Im vorliegenden Fall wurde versucht, diesem Phänomen durch den Einsatz von leichter Sprache entgegenzuwirken. Auch das spezifische **Verhalten des Interviewers** spielt in diesem Fall eine große Rolle, sodass durch das erkennbare Zeigen von Interesse, durch ein geduldiges Auftreten und das Ausstrahlen von Ruhe die „Meinungslosigkeit“ stark reduziert werden kann (vgl. Laga und Lauffer 1980). Der Effekt der Antwortverweigerung konnte in der bisherigen Zusammenarbeit mit Menschen mit geistiger Behinderung in Vorstudien etc. nicht beobachtet werden, weshalb nicht speziell auf dieses Phänomen reagiert wurde.

Zusätzlich ist während den Evaluierungen eine hohe Sensibilität der Betreuer und das Erreichen einer Vertrauensbasis für die Versuchsteilnehmer von großer Bedeutung. Dadurch, dass Menschen mit geistiger Behinderung häufig langsamer denken und begreifen sowie sich nur mit Schwierigkeiten äußern können, sind sie häufig besonders stressempfindlich (vgl. Heijkoop 2014).

Des Weiteren wird im Umgang mit Menschen mit geistiger Behinderung oft ganz selbstverständlich ein unterordnendes „Du“ verwendet (vgl. Goeke 2010). In den Evaluierungen wird demgegenüber besonderer Wert auf eine förmliche und respektvolle Begegnung mit der Personengruppe gelegt. In den vorliegenden Untersuchungen werden ausgehend von ihrem Alter alle Versuchsteilnehmer gesiezt. Nur auf Wunsch der Versuchsteilnehmer werden sie ggf. geduzt.

Unter Beachtung der genannten Aspekte werden im nachfolgenden Kapitel die für die Ermittlung der Evaluationskriterien benötigten Messwerkzeuge vorgestellt und näher erläutert.

### **8.1.6 Studienunterlagen**

Um den Nutzen der Systeme zu quantifizieren, werden für die definierten objektiven (auf Messungen basierenden) und subjektiven (auf Beobachtungen und Meinungen der Nutzer basierenden) Evaluationskriterien (siehe Kap. 8.1.3) Fragebögen und Datenblätter ausgewählt bzw. entwickelt. Die Entwicklung und Erstellung erfolgte unter Zuhilfenahme und Einhaltung der Regeln für eine gelungene Fragebogenkonstruktion von Porst (vgl. Porst 2014) und wird nachfolgend näher erläutert.

#### ***Kommissionierfehlerrate und Kommissionierzeit***

Die logistischen Kennzahlen zur Messung der Qualität (Kommissionierfehlerrate) und der Zeitkosten (Kommissionierzeit) werden händisch, über eine tabellarische Fehler- und Zeitaufnahmeliste auf einem für jede Systemtechnologie gesonderten Datenblatt, erfasst. Die Kommissionierfehlerrate ergibt sich aus der Fehleranzahl pro Versuchsdurchgang im Verhältnis zur Anzahl der insgesamt kommissionierten Artikel (28 Einzelteile).

Die Fehlerarten werden in Mengen-, Typ-, Auslassungs- und Prozessfehler unterschieden. Die Prozessfehler werden noch einmal in verschiedene Fehlerarten wie z.B. das Vergessen des Wiegeprozesses, das Stehenlassen des Wagens, das Nichtbetätigen des Quittiertasters etc. unterteilt. Auslassungs- und Prozessfehler werden während der jeweiligen Erhebung von einem Mitarbeiter des Studienteams erfasst. Nach dem Beenden eines Versuchsdurchlaufs werden die einzelnen Kommissionierpositionen überprüft und die Mengen- und Typfehler aufgenommen (siehe Kap. 2.1.1). Die Zeiterfassung erfolgt mit einer Stoppuhr, startet beim Loslaufen von der gekennzeichneten Startposition und endet an der letzten Entnahmeposition mit dem Ablegen des Artikels. Bei jedem abgelegten Artikel werden Zwischenzeiten erfasst und im Anschluss an den Versuchsdurchlauf in das Datenblatt übertragen.

#### ***Subjektive Beanspruchung***

Wie bereits in Kapitel 8.1.3 erläutert, wird die subjektiv erlebte mentale Beanspruchung über den NASA-TLX ermittelt. In ersten Studien wurde jedoch festgestellt, dass die reguläre Version dieses Fragebogens durch eine zwanzigteilige Skala die Versuchsteilnehmer in ihrem Entscheidungsprozess überfordert. Aus diesem Grund wurde das Messinstrument in Zusammenarbeit mit einer Pädagogin und einem Psychologen für die Nutzergruppe modifiziert. Dabei wurden die zwanzig Antwortmöglichkeiten der sechs Dimensionen auf jeweils vier Möglichkeiten reduziert. Es wurde eine gerade Anzahl an Antwortmöglichkeiten ausgewählt, um eine bevorzugte „Wahl der Mitte“ zu verhindern. Nach Bortz und Döring gibt es bei einer typischen fünf- oder sieben-stufigen Likert-Skala den Nachteil, dass die mittleren Einstellungswerte nicht eindeutig interpretierbar sind (vgl. Bortz und Döring 2009). Auch Goeke verweist darauf, dass „mittige Antworten“ darauf schließen lassen, dass besonders Versuchspersonen mit geistiger Behinderung den Inhalt des Items falsch verstanden, als mittelmäßig zutreffend empfunden oder keine Meinung dazu haben (vgl. Goeke 2010). Bortz und Döring empfehlen daher eine Erklärung bei der Instruktion, wie die einzelnen Werte zu verstehen sind, und/oder die Verwendung einer geradzähligen Skala. Hinsichtlich der vorliegenden Zielgruppe und ihrer Tendenz zur Meinungslosigkeit eignet sich vor allem eine vierstufige Skala (siehe Kap. 8.1.5).

Die vier Antwortmöglichkeiten der sechs Dimensionen wurden zur besseren Veranschaulichung jeweils durch einen Smiley (lachend, lächelnd, missmutig, traurig) dargestellt (siehe Abbildung 65) und die Formulierung der Items in leichte Sprache übersetzt (siehe Anhang S. 172).

Geistige Anforderung				
	sehr einfach	einfach	kompliziert	sehr kompliziert
Ich fand die Anleitung einfach/ kompliziert.				

Abbildung 65: Auszug des modifizierten NASA-TLX für das Item "Geistige Anforderung"

### **Persönlicher Fragebogen**

Neben den objektiven und subjektiven Variablen zur Erfassung des Nutzens bzw. der Gebrauchstauglichkeit wurde ein Fragebogen zur Erfassung von personenbezogenen Daten und subjektiven Einschätzungen konzipiert. Der eingesetzte Fragebogen ist in folgende Abschnitte unterteilt:

- Fragebogeneinleitung mit kurzer Erläuterung der Fragebogeninhalte
- Demografische Daten
- Fragen zum Kommissionierassistenzsystem
- Priorisierung der vier Systeme
- Freier Antwortteil

Der erste Teil des Fragebogens umfasst Angaben zu den demografischen Daten wie Geschlecht, Alter, Größe und einer etwaigen Sehbehinderung, die Auswirkungen auf die Lesbarkeit der projizierten Anleitungen haben könnte. Zusätzlich wurde durch diesen Fragebogen abgefragt, ob die Versuchsteilnehmer einen Beruf mit technischem Hintergrund erlernt haben, ob sie bereits Erfahrungen mit Kommissioniersystemen gemacht haben und ggf. mit welchem System. Außerdem sollten sie ihre PC-Kenntnisse nach dem Schulnotenprinzip von eins (sehr gut) bis sechs (ungenügend) bewerten (siehe Anhang S. 174). Dieser Teil wurde vor Beginn des Versuchs ausgefüllt.

Der zweite Teil des Fragebogens wird nach dem Versuchsdurchlauf mit Pick-by-Projection ausgefüllt. Mit Hilfe der einzelnen Items soll den Befragten ermöglicht werden, auf Basis ihrer eigenen Erfahrungen subjektive Urteile zu Systemaspekten von Pick-by-Projection abzugeben (vgl. Sarodnick und Brau 2011). Dieser Fragebogenteil besteht aus 14 Statements, die sich auf das Assistenzsystem für Kommissionierprozesse (Pick-by-Projection) beziehen und wichtige Erkenntnisse und Verbesserungspotenziale des Assistenzsystems erschließen sollen (siehe Anhang S. 174). Die Statements werden alle mit einer verbalen bipolaren Skala mit sechs Abstufungen von „stimmt genau“ bis „stimmt überhaupt nicht“ beantwortet. Um die Aufmerksamkeit und Konzentration der Probanden zu fördern und eine „Ja-Sage-Tendenz“ (siehe Kap. 8.1.5) zu vermeiden, wird bei zwei Fragen eine invertierte und damit negierte (statt einer positiven) Formulierung verwendet (vgl. Moosbrugger 2012).

Als letzter Fragebogenteil werden nach Abschluss des vierten Versuchsdurchlaufs einige Fragen zur Priorisierung der vier Systeme gestellt und abschließend die Möglichkeit gegeben, in einem freien Kommentarfeld Anmerkungen und/oder Verbesserungsvorschläge aufzuführen (siehe Anhang S. 174). Die Rangordnungsaufgaben unterteilen sich in sechs Einzelitems nach folgenden Kriterien: Bewertung insgesamt, Erlernbarkeit, Komfort, Geschwindigkeit, Fehlervermeidung und Eignung für Arbeitstätigkeiten über einen längeren Zeitraum.

Die einzelnen Systeme werden dabei nach dem Verfahren der direkten Rangordnung aufsteigend mit einer „1“ für das System mit der stärksten Merkmalsausprägung und einer „4“ für das System mit der viertstärksten Merkmalsausprägung bewertet (vgl. Bortz und Döring 2009).

Die einzelnen Fragebogenteile werden von den normal leistungsfähigen Versuchsteilnehmern eigenständig ausgefüllt. Bei den leistungsgeminderten Versuchsteilnehmern hingegen erfolgt das Nachvollziehen und Ausfüllen des Fragebogens bei Bedarf mit Unterstützung durch einen Versuchsbetreuer. Bei Beobachtung eines besonders hohen Unterstützungsbedarfs erfolgt die Fragebogenbearbeitung in einem interviewähnlichen Gespräch mit einem Versuchsbetreuer.

### **8.1.7 Umsetzung forschungsethischer Prinzipien**

Die Durchführung von experimentellen Studien mit menschlichen Individuen, insbesondere mit Menschen mit Behinderung, erfordert die Berücksichtigung von forschungsethischen Kriterien. Wie Unger in ihrer Kernthese formuliert, sind „forschungsethische Fragen [...] immanenter Bestandteil der empirischen Forschungspraxis und stellen sich in allen Phasen des Forschungsprozesses – von der Themenwahl und Zielsetzung über das Studiendesign, den Zugang zum Feld, Verfahren der Datenerhebung und Auswertung bis hin zu Fragen der Publikation und Verwertung von Forschungsergebnissen“ (Unger et al. 2014, S. 16).

Bei besonders vulnerablen Personengruppen, wozu auch die leistungsgeminderten Versuchsteilnehmer zählen, sind ein spezieller Schutz und eine außerordentliche Fürsorge für die Teilnehmenden nötig. Diese Forderung ist im Ethik-Kodex der Deutschen Gesellschaft für Soziologie (DGS) verankert und lautet:

„Besondere Anstrengungen zur Gewährleistung einer angemessenen Information sind erforderlich, wenn die in die Untersuchung einbezogenen Individuen über eine geringe Bildung verfügen, einen niedrigen Sozialstatus haben, Minoritäten oder gesellschaftlich marginalisierten Bevölkerungsgruppen angehören“ (DGS und BDS 2014, S. 2).

Der erste Schritt zur Beachtung forschungsethischer Prinzipien ist die Einreichung eines Ethikantrags bei der Ethik-Kommission der Deutschen Gesellschaft für Psychologie (DGP). Der Antrag wurde nach sorgfältiger Prüfung am 15.03.2015 als „ethisch unbedenklich“ bewertet.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Themen der Forschungsethik und ihre Prinzipien kurz vorgestellt, die sich auf die Vorbereitung, Durchführung und Verwertung der Evaluierungen beziehen.

#### ***Freiwillige Untersuchungsteilnahme***

Die Teilnahme an den Evaluierungen erfolgt auf freiwilliger Basis ohne finanzielle Vergütung. Zudem haben die Teilnehmer auch während der Evaluierung jederzeit das Recht, die Untersuchungen abubrechen. Keiner der Versuchsteilnehmer wird dazu gedrängt oder gezwungen, an den Evaluierungen teilzunehmen oder auf eine bestimmte Weise zu agieren. Im Anschluss an die erste Studie wird eine Verlosung mit Sachpreisen für die Teilnehmenden durchgeführt. Bei der zweiten und dritten Evaluierung werden zum Abschluss Anerkennungen in Form von Süßigkeiten an die Versuchsteilnehmer vergeben.

#### ***Aufklärung über Untersuchungsinhalte und -ziele***

Die Beteiligung an den Untersuchungen erfolgt auf Grundlage einer vorab durchgeführten ausführlichen Information über Ziele und Methoden des Forschungsvorhabens. Die Aufklärung über die Untersuchungsinhalte erfolgt vier Wochen vor Studienbeginn innerhalb der WfbM in Form einer Präsentation des Studiendesigns für die potenziellen Versuchsteilnehmer.



Zusätzlich wird am Tag der Versuchsdurchführung – nach der Begrüßung der Teilnehmer – erneut das Vorhaben und die Laborumgebung mit dem Versuchsaufbau vorgestellt. Unmittelbar vor Versuchsbeginn findet mit dem jeweiligen Versuchsteilnehmenden eine individuelle Einführung in den Versuchsablauf statt. Anschließend wird dem Teilnehmenden eine Einverständniserklärung in leichter Sprache ausgehändigt<sup>31</sup>, die bei Bedarf vorgelesen und im Detail erläutert wird. Die Erklärung enthält eine kurze Beschreibung des Vorhabens, die ungefähre zeitliche Dauer, eine Erklärung bzgl. der Datenerfassung, die Möglichkeit zur Zustimmung oder Ablehnung für die Erstellung von Bildern oder Videos, eine Erklärung des Nutzens, eine Erläuterung zu den Teilnehmerrechten und zur Vertraulichkeit (siehe Anhang S. 177). Zum Schluss wird die Erklärung unter Angabe des Ortes und Datums vom jeweiligen Teilnehmenden unterschrieben, wodurch die informierte Einwilligung dokumentiert ist. Während der gesamten Bearbeitungszeit ist ein Studienmitglied zur Betreuung anwesend, um Fragen zu beantworten, bei Unklarheiten zu helfen oder auch bei Bedenken oder Ängsten als Ansprechpartner zu dienen.

### ***Sicherung der Anonymität und Umgang mit (vertraulichen) Daten***

In empirischen Untersuchungen muss die Anonymität von persönlichen Angaben und Untersuchungsdaten gewährleistet werden (vgl. Bortz und Döring 2009). Deshalb wird bei allen Fragebögen statt eines Namens eine Nummer verwendet, um keine Rückschlüsse auf die Person ziehen und eine Identifizierung ausschließen zu können. Zudem wird jedem Versuchsteilnehmer durch die Einwilligungserklärung in schriftlicher Form versichert, dass die Daten nur zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet werden. Die Datenspeicherung erfolgt auf einem externen Speichermedium ohne Internetzugang, das nur dem Forscherteam zugänglich ist. Hierdurch soll Missbrauch verhindert und der bestmögliche Datenschutz sichergestellt werden.

### ***Kommunikative Validierung und Publikation der Ergebnisse***

Nach Abschluss der Evaluierungen werden die Untersuchungsergebnisse den Versuchsteilnehmenden in Form einer für die Zielgruppe verständlichen Präsentation in der WfbM vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Ergebnisdiskussion. Damit soll sichergestellt werden, dass die Probanden der Veröffentlichung der Ergebnisse zustimmen.

Die Personen, die an den Evaluierungen teilnehmen, dürfen durch die Veröffentlichung der Ergebnisse keinen Nachteilen oder Gefahren ausgesetzt werden. Zudem müssen sie über Risiken, die ein im Alltag übliches Maß überschreiten, aufgeklärt und die Anonymität gewahrt werden (vgl. DGS und BDS 2014). Die Publikation der Ergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten Evaluierungen erfolgt durch die Vorstellung auf Fachkonferenzen und mit der vorliegenden Arbeit. Da es sich bei den Evaluierungen lediglich um den Vergleich von vier technischen Systemen handelt, werden dadurch weder vertrauliche Daten veröffentlicht, noch werden die Versuchsteilnehmer dadurch Nachteilen oder Gefahren ausgesetzt. Die Erkenntnisse werden dabei so formuliert, dass sie die Würde der Versuchsteilnehmenden nicht verletzen.

---

<sup>31</sup> Diese informierte Einverständniserklärung in leichter Sprache wurde unter Hinzuziehung von Expertenwissen aus der WfbM entwickelt. Besondere Beachtung fanden dabei die Beschreibung der Evaluierungsziele sowie die Verwendung der Daten und die Sicherstellung der Anonymität. Darüber hinaus wurde besonderes Augenmerk auf eine Ergänzung der Textbausteine durch Bilder und Symbole gelegt, um eine gute Verständlichkeit zu fördern (vgl. Fischer et al. 2016) (siehe Anhang S. 185).

Zudem haben sich alle Mitglieder des Studienteams den „Guiding Principles for Evaluators“ der American Evaluation Association (AEA) (vgl. American Evaluation Association 2004) verpflichtet. Diese fordern von den Evaluatoren

- eine systematische, datenbasierte Durchführung der Untersuchung des zu evaluierenden Gegenstands,
- eine ausreichende Fachkompetenz zur Durchführung von Evaluationsstudien,
- die Sicherstellung der Aufrichtigkeit und Integrität über den gesamten Evaluationsprozess,
- die Respektierung der Persönlichkeitsrechte aller Beteiligten und
- ein Verantwortungsgefühl für die Vielfalt an Interessen und Werten gegenüber dem Allgemeinwohl.

## 8.2 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der zur Durchführung der Evaluierungen erforderliche Versuchsaufbau vorgestellt. Dabei wird in einem ersten Schritt auf die technischen Funktionselemente (Lager-, Förder- und Ladehilfsmittel, siehe auch Kap. 2.1.5) des Kommissioniersystems, die Lagerortkennzeichnung und die in der Laborumgebung vorhandene Artikelstruktur eingegangen. Abschließend werden die eingesetzten informationstechnischen Verfahren zur Kommissioniererführung vorgestellt (siehe auch Kap. 3.1).

### 8.2.1 Lageraufbau und -umgebung

In der vorliegenden Arbeit findet die Untersuchung in der Laborumgebung (siehe Kap. 8.1.1) des Forschungsbereiches für „Assistenzsysteme zur Unterstützung manueller Industrieprozesse“ der Hochschule Esslingen statt. Zu den Grundelementen des Aufbaus gehören zwei – mit KLTs bestückte – Durchlaufregallager, ein höhenverstellbarer Kommissionierwagen (siehe Abbildung 66 und Kap. 7.1) und die vier verschiedenen Verfahren der Kommissionierung mit den jeweiligen Hardwarekomponenten (siehe Kap. 8.2.4). Die Handhabung erfolgt rein manuell ohne den Einsatz von Hilfsmitteln.

*Die eingesetzten Durchlaufregallager entsprechen dem Regaltyp, der auch in der WfbM als Intralogistiklager eingesetzt wird (siehe*

Abbildung 28, Abbildung 66 und Kap. 6.1). Eine Regallagereinheit hat eine Länge von ca. 1920 mm, womit die Gesamtlagerlänge ca. 3840 mm beträgt. Die Tiefe der Lagereinheiten beträgt 911 mm, wobei die Durchlaufrahmen (Regalebenen) nach vorne und hinten im Durchschnitt um jeweils ca. 175 mm herausragen. Aus ergonomischen Gründen und um eine Projektion von oben zu ermöglichen, sind die einzelnen Rahmen jedoch versetzt eingebaut. In einer Lagereinheit befinden sich vier Regalebenen. Dabei dienen die oberen drei Ebenen der Entnahme und die unterste Ebene der Rückführung von Leerbehältern. Die oberen drei Entnahmeebenen sind aus ergonomischen Gründen nach vorne hin abgeknickt, um die Entnahmehöhe der obersten Ebene zu reduzieren und zusätzlich die Zugänglichkeit für die Entnahme der einzelnen Behälter zu verbessern. Die oberste Ebene befindet sich auf ca. 1300 mm und ist nur für die Einzelteilentnahme vorgesehen. Die beiden mittleren Ebenen hingegen sind ausschließlich für die Gesamtbehälterentnahme vorgesehen. Die einzelnen Regalebenen sind durch zehn Rollenleisten in fünf sortenreine Durchlaufkanäle eingeteilt. Zusätzlich befinden sich zwischen den einzelnen Durchlaufkanälen Trennleisten, die eine Abgrenzung der einzelnen Lagerkanäle sicherstellen. Somit stehen 15 gleich breite Lagerkanäle pro Regaleinheit bzw. insgesamt 30 Lagerkanäle zur Verfügung. Durch das Weiterrollen nach dem FIFO-Prinzip (First In – First Out) kann

den einzelnen Behältern bzw. Artikeltypen kein fester Lagerplatz, sondern nur ein Kanal zugeordnet werden.

Als Ladehilfsmittel werden für die Automobil- bzw. Zuliefererindustrie übliche KLTs des Typs RL-KLT3147-K2-SK und des Typs RL-KLT4147-L2-SK (siehe Abbildung 66) eingesetzt. Der Vorteil dieser KLT-Art ist, dass er mit einer verschiebbaren Stirnklappe versehen ist, er vereint also die Vorzüge der Normung und Stapelbarkeit eines KLTs mit der Zugänglichkeit und Einsehbarkeit eines Sichtlagerkastens. Die KLTs haben die Abmessungen 297 x 198 x 147,5 mm und 396 x 297 x 147,5 mm. Bei Belegung eines Lagerkanals mit dem KLT 3147 können drei Lagerbehälter hintereinander eingelagert werden. Bei Belegung mit dem KLT 4147 sind sechs Lagerbehälter pro Kanal möglich. Der Versuchsaufbau beinhaltet eine Belegung von 26 Kanälen mit den KLTs 4147 und vier Kanälen mit den KLTs 3147. Somit sind zu Studienbeginn insgesamt 102 Behälter eingelagert.

Die Bestückung der Kanäle erfolgt von der Rückseite des Regallagers. Zur Sicherstellung des korrekten Einsortierens sind die Lagerorte auf der Regalrückseite mit Nummern gekennzeichnet. Die Nummerierung beginnt von der Rückseite aus gesehen links unten und geht nach rechts oben (siehe Kap. 8.2.2).

Zur Vervollständigung des Kommissioniersystems, ist ein Fördermittel (siehe Kap. 2.1.5) erforderlich. Hierfür wurde im Zuge der Entwicklung von Arbeitsplätzen zur Montage z.B. von Schraubzwingen oder PKW-Anlassern ein Kommissionierwagentyp nach dem Wechselwagen-Prinzip entwickelt und gefertigt (siehe Kap. 5.3.1). Dies bedeutet, dass der Kommissionierwagen nach der Bestückung am Kommissionierlager und dem anschließenden Transport an den Arbeitsplatz angedockt wird und dort bis zur vollständigen Montage der bereitgestellten Artikel verbleibt. Dies hat den Vorteil, dass nach der Bestückung keine weiteren Handhabungsschritte erforderlich sind und sich das Fehlerpotenzial durch falsch abgelegte Artikel stark reduziert. Gleichzeitig ist es daher umso wichtiger, dass die Bestückung des Wagens mit den einzelnen Artikeln in der richtigen Menge am richtigen Ort (Ablagekanal) erfolgt, um dadurch die korrekte Ausgangssituation für die Montage zu bieten, die mit einem weiteren Assistenzsystem angeleitet wird.

Der Kommissionierwagen besteht aus einer höhenverstellbaren Grundeinheit und einem Aufbau aus zwei getrennten Bereichen mit jeweils zwei Ebenen (siehe Abbildung 66). Der aus Kommissioniersicht linke Bereich beinhaltet zwei Kanäle mit Leerbehältern, welche am Montagearbeitsplatz zurückgeführt wurden. Im rechten Bereich befinden sich sowohl in der oberen als auch in der unteren Ablageebene jeweils vier Ablagekanäle. In die schmalen Kanäle der KLTs 3147 können drei KLTs hintereinander eingelagert werden und in die breiten Kanäle der KLTs 4147 maximal zwei KLTs. Diese werden immer in Längsrichtung eingeschoben, um am Arbeitsplatz eine leichte Zugänglichkeit und Einsehbarkeit durch die heruntergeschobenen Sichtklappen zu ermöglichen.

Aufgrund der Anordnung des Kommissionieraufbaus am Rande des Laborbereiches (unter einem Podest) waren Umgebungseinflüsse wie z.B. durch direkte Sonneneinstrahlung kaum vorhanden und hatten folglich einen nur geringen bis keinen negativen Einfluss auf die Helligkeit und Projektionsqualität. Trotzdem war die Lagerumgebung über eine Deckenbeleuchtung gut ausgeleuchtet (Beleuchtungsstärke ca. 500lx). Der Geräuschpegel in der Laborumgebung war niedrig (Lärmexpositionspegel < 40 dB(A)) und entsprach in etwa den in der Industrie vorzufindenden Gegebenheiten. Die Arbeitsumgebung bietet somit gute Voraussetzungen für ein angenehmes Raumklima und das Wohlbefinden der Teilnehmer.



Abbildung 66: Lageraufbau in Laborumgebung

### 8.2.2 Lagerortkennzeichnung

Die Beschriftung der Lagerplätze orientiert sich ebenfalls an den in der Praxis gängigen Standards für die Lagerortkennzeichnung. Dies beinhaltet eine eindeutige Bezeichnung des Regals, des Fachs und der Ebene (vgl. Hompel et al. 2011). Die Bezeichnung dieser drei „Koordinaten“ wird in der Industrieanwendung entweder rein numerisch oder alphanumerisch umgesetzt. Durch die abwechselnde Verwendung von Buchstaben und Ziffern können die einzelnen Elemente der Lagerplatzkennzeichnung von normal leistungsfähigen Menschen gut unterschieden werden. Für leistungsgeminderte Menschen stellt diese Kennzeichnung jedoch ein Problem dar: Sie können zwar oftmals lesen, aber die Reihenfolge des Alphabets ist ihnen häufig nicht bekannt. Die Zahlenreihenfolge von 1-20 ist den meisten leistungsgeminderten Menschen hingegen bekannt (siehe Kap. 4.2.2), da diese auch im Alltag beispielsweise im Umgang mit Geld, beim Einkaufen, bei der Nutzung eines Mobiltelefons benötigt und verwendet wird. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Versuchsaufbau eine strukturierte (die einzelnen Lagerkoordinaten sind mit Trennstrichen voneinander getrennt) und numerische Kennzeichnung des Regals, des Fachs und der Ebene eingesetzt (vgl. Lolling 2003) (siehe Abbildung 67, links). Dies stellt eine eindeutige, gut lesbare und strukturierte Beschriftung sicher, wodurch Fehler beim Ablesen reduziert werden sollen (vgl. Reif 2009).

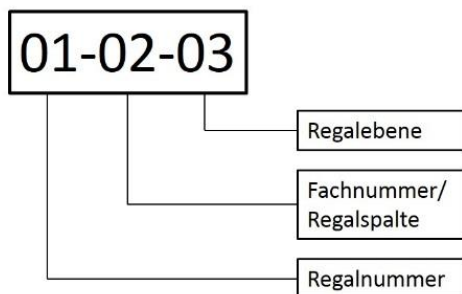


Abbildung 67: Klassifizierung der Lagerortkennzeichnung (links), Umsetzung der Lagerortkennzeichnung mittels Kunststoffclips (rechts)

Die Beschriftung für die Verfahren Pick-by-Paper, -Voice und -Display (siehe Kap. 8.2.4) erfolgt durch bedruckte Kunststoffschilder mit einer Cliquelleiste, welche einzeln vor jedem Entnahme- und Ablagefach an den Projektionswinkeln befestigt werden. Durch diese Befestigungsart kann die Lagerortkennzeichnung schnell und flexibel für die einzelnen Kommissioniermethoden an- bzw. abgebaut werden (siehe Abbildung 67, rechts). Die Nummerierung beginnt, von der Vorderseite des Regals aus gesehen, rechts unten und geht nach links oben. Aufgrund der verschiedenen Anleitungsformen wird für die Verfahren Pick-by-Light und -Projection keine numerische Fachkennzeichnung am Lager- und Ablageort benötigt.

### 8.2.3 Artikelstruktur

Das Lagersortiment besteht aus den Einzelteilen für acht verschiedene Schraubzwingentypen. Eine Schraubzwinde besteht dabei aus fünf verschiedenen Einzelteilen (Ober-, Unterteil, Profilstange, Griff und Druckplatte) und kann in jedem dieser Einzelteile variieren. Einzige die Druckplatte als kleinstes Einzelteil wird in der kleinen KLT-Größe eingelagert. Alle anderen Einzelteile werden in den KLTs 4147 bereitgestellt. Bei der Einlagerung der Einzelteile wurde eine Grenzlastermittlung nach Burandt und Schultetus durchgeführt (vgl. Bokranz und Landau 2006). Diese ergab ein Maximalgewicht von 10,14 kg für die Beladung eines KLT. Mit dem Gewicht des schwersten eingelagerten Bauteils – der Profilstange – von durchschnittlich 594 g und unter Berücksichtigung des KLT-Gewichts von 1114 g ergibt sich in Abhängigkeit von der Grenzlastermittlung eine Maximalstückzahl von 15 Stück pro KLT. Aufgrund dieser Kennwerte wurden die Losgrößen pro Behälter auf 15 bzw. bei leichten Bauteilen unter Einhaltung des Grenzlastgewichts auf 30 Einzelteile festgelegt.

Um eine industrienähe Anwendung und eine Identifizierbarkeit der KLTs im Regallager abzubilden, wurden für jeden KLT Kanban-Karten (japan. Kanban= Schild, Karte) erstellt. Diese Karten mit ihren Informationen dienen zur Verbrauchs- bzw. Materialsteuerung bei der Montage von beispielsweise Schraubzwingen oder PKW-Anlassern mit Hilfe eines Montageassistenzsystems (vgl. Bächler et al. 2015a). Eine solche Kanban-Karte enthält die Zuordnung des Artikels zum Modelltyp, die Bezeichnung des Artikels, den Lieferanten, den Behältertyp, die Artikelnummer, den Lagerplatz, einen artikel- und behälterspezifischen Barcode mit Artikelnummer, eine Abbildung des Artikels und die enthaltene Stückzahl (nur bei der Gesamtbehälterentnahme) (siehe Abbildung 68).

Modell: <b>TG16</b>	Bezeichnung: <b>Kunststoffgriff, klein</b>	Lieferant: <b>Bessey</b>
Behältertyp: <b>KLT 3147-K2</b>	Artikelnummer: <b>3101648</b>	Lagerplatz: <b>02-04-03</b>
	Abbildung: 	Anzahl (Stk.): <b>15</b>

Abbildung 68: Exemplarische Kanban-Karte zur KLT-Kennzeichnung

Die Einteilung der einzelnen Ebenen für die Einzelteil- und Gesamtbehälterentnahme bzw. die Zuordnung der Artikel in die einzelnen Ebenen erfolgt mit Hilfe des Bosch Ergonomieratgebers und der Gruppierung der Körpergrößen in Deutschland nach DIN 33402 sowie DIN EN ISO 7250 (vgl. Bosch Rexroth AG 2009; DIN 33402; DIN EN ISO 7250). Dafür wurden die einzelnen Ebenen nach ihrer Höhe und ergonomischen Kriterien in A-, B- und C-Ebenen klassifiziert. Hierbei ist die A-Ebene ergonomisch sehr gut und die C-Ebene sehr schlecht zugänglich.

Die Zuordnung der einzelnen Artikel in die Ebenen erfolgte nach dem Entnahmegewicht und der -häufigkeit der verschiedenen Artikel und Behälter. Die Artikel der Einzelteilentnahme haben ein geringes Gewicht und sind als Langsam- bis Mitteldreher<sup>32</sup> klassifiziert, weshalb die Einzelteilentnahme in die oberste Ebene (C-Ebene) eingeteilt wird. Die leichten Artikel bzw. KLTs der Gesamtbehälterentnahme werden der mittleren Entnahmeebene (B-Ebene) zugeteilt. Alle schweren Artikel der Gesamtbehälterentnahme wie Oberteil, Unterteil und Profilstange werden der untersten Entnahmeebene (A-Ebene) zugeordnet. Die Position in den einzelnen Ebenen ist chaotisch gewählt, was zur Folge hat, dass optisch ähnliche – aber artikelspezifisch unterschiedliche – Bauteile auch nebeneinander eingelagert sein können.

#### 8.2.4 Arten der Informationsbereitstellung

Im Folgenden werden die vier gängigsten Verfahren zur Kommissionierung, die zusammen mit Pick-by-Projection in den Evaluierungen die vier Stufen der unabhängigen Variablen (siehe Kap. 8.1.2) darstellen, in ihrer Umsetzung (in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen in Kap. 3.1) dargestellt. So soll die anschließende Beschreibung der Evaluierungsdurchführung nachvollziehbarer werden.

Als Verfahren mit papiergebundener Informationsübermittlung wird eine Kommissionierliste eingesetzt (siehe Kap. 3.1.1). Nachfolgend wird dieses Verfahren als Pick-by-Paper bezeichnet. Von den beleglosen Übermittlungsverfahren werden in den ersten beiden Studien die lichtgebundene (Pick-by-Light) und die bildschirmgesteuerte (Pick-by-Display) Kommissionierführung eingesetzt (siehe Kap. 3.1.2 und Kap. 3.1.3). In der abschließenden Studie wird die Kommissionierführung mittels Pick-by-Display durch eine sprachgesteuerte Kommissionierführung (Pick-by-Voice, siehe Kap. 3.1.4) ersetzt. Diese vier Verfahren werden jeweils mit dem neuentwickelten Assistenzsystem mit einer projektionsgesteuerten Führung (Pick-by-Projection, siehe Kap. 7) verglichen.

##### **Pick-by-Paper**

Unter Einhaltung von Regeln für die Strukturierung und die Gestaltung von Kommissionierlisten wie z.B. der grafischen Ordnung nach Positionen und der Verwendung einer ausreichend großen Schriftart (vgl. Hompel et al. 2011; Lolling 2003), wurden eigene Listen erstellt (siehe Abbildung 69). Diese orientieren sich an gängigen Vorlagen, welche in der Industrie eingesetzt werden (siehe Abbildung 18). Die für die Kommissionierung wichtigen Daten wie Lager- und Ablageort sowie Entnahmemenge und -einheit sind pro Auftragsposition in einer Zeile dargestellt. Die Angabe der Artikelnummer und -bezeichnung sind für die Kommissionierung nicht zwingend erforderlich. Sie dienen aber dem Kommissionierer zum Abgleich und zur Bestätigung für die Entnahme des korrekten Artikels und sind in jeder Zeile zwischen dem Ablageort und der Entnahmemenge aufgeführt. Das letzte Feld in jeder Zeile dient zur manuellen Quittierung der ausgeführten Entnahme- und Ablagevorgänge durch das händische Setzen eines Hakens. Zusätzlich bietet der Quittierhaken, wie auch das erste Feld mit den Positionsdaten, eine Orientierungsmöglichkeit auf der Liste für die nachfolgende Entnahmeposition.

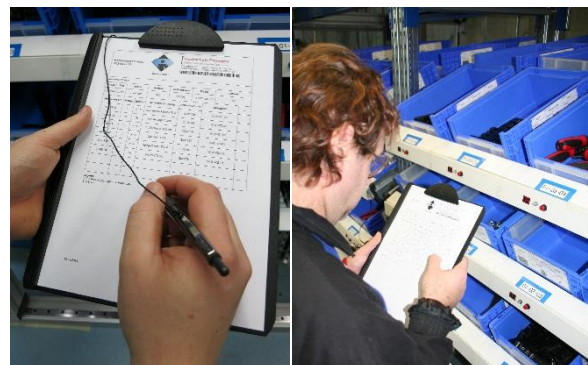


Abbildung 69: Experimenteller Aufbau des Pick-by-Paper Systems

<sup>32</sup> Langsam- bis Mitteldreher sind Artikel, die selten nachgefragt werden, jedoch einen mittelgroßen bis großen Anteil des Gesamtsortiments ausmachen (vgl. Hompel et al. 2011).



Am Ende soll jeder Versuchsteilnehmer die erfolgreiche und korrekte Abarbeitung des Auftrags mit einer Unterschrift bestätigen. Die Kommissionierliste wird den Versuchsteilnehmern am Startort auf einem Klemmbrett mit befestigtem Kugelschreiber ausgehändigt. Die Lager- und Ablageortkennzeichnung erfolgt wie in Kapitel 8.2.2 beschrieben durch bedruckte Kunststoffschilder, die vor den einzelnen Fächern befestigt sind.

### **Pick-by-Light**

Eine kombinierte Form aus Pick-by- und Put-to-Light wird häufig bei der auftragsparallelen Kommissionierung oder beim Einsatz von Kommissionierwagen mit mehrfach unterteilten Fächern verwendet (vgl. Hompel et al. 2011).

Daher wird für die Evaluierungen ein selbst entwickeltes und gefertigtes Pick-by- und Put-to-Light-System eingesetzt (siehe Abbildung 70).

Die eigenentwickelte Lösung wurde nach der Durchführung einer Nutzwertanalyse mit paarweisem und kaufmännischem Vergleich ausgewählt. Vor allem der geringe Aufwand für die Umsetzung, den Aufbau und den Betrieb, aber auch die geringen Investitionskosten dieser Lösung von ca. 130 € haben gegenüber den industrietauglichen Systemen überzeugt.



Abbildung 70: Experimenteller Aufbau des Pick-by-Light-Systems

Die kombinierte Lösung (Pick-by- und Put-to-Light) basiert auf 38 digitalen LEDs (30 für die Entnahme und acht für die Ablage), welche einzeln über einen Mikrocontroller (Arduino Mega) angesteuert werden können und zusammen mit einem Quittiertaster in Kabelkanälen eingebaut sind. Die Größe der Kabelkanäle ist so gewählt, dass sie direkt unter die Projektionswinkel passen und sich in den Gesamtaufbau des Lagers integrieren, ohne sich davon abzuheben oder das Gesamtbild zu stören (siehe Abbildung 70). Die Entnahmemenge wird den Versuchsteilnehmern über aufgeklebte Digitalanzeigen angezeigt. Das System wird von einem Bediener mittels Steuerknopf gesteuert (Wizard-of-Oz-Methode). Aufgrund der Realisierung als verkabelte Lösung befindet sich zwischen dem Regal und dem Wagen ein ausreichend langes Kabel, um auch den Verschiebeprozess zu ermöglichen. Um einen Anfang am Startpunkt zu ermöglichen, wird das System jedoch zuvor abgekoppelt und nach dem Andocken des Wagens wieder eingesteckt.

### **Pick-by-Display**

Die Umsetzung einer Pick-by-Display-Lösung erfolgt mit Hilfe des bereits vorhandenen Touchscreens. Er ist über einen Dreh- und Schwenkarm auf der linken Seite am verschiebbaren Rahmengestell der Assistenz-einheit befestigt. Durch die Touchfunktion dient er gleichzeitig auch als Eingabemedium zur Bestätigung von Kommissionierschritten.

Die Gestaltung und der Aufbau des eigenentwickelten Pick-by-Display-Systems orientiert sich an einer gängigen Industrielösung eines Staplerterminals und ist in Abbildung 71 zu sehen.



Abbildung 71: Experimenteller Aufbau des Pick-by-Display-Systems

Im Gegensatz zur Kommissionierliste wird dem Kommissionierer bei diesem System jeweils nur eine Auftragsposition auf dem Display angezeigt. Die dargestellten Informationen sind wie bei der Kommissionierliste der Lagerplatz, die Artikelnummer, die Bezeichnung, die Menge und Einheit sowie der Ablageplatz. Eine fertig kommissionierte Auftragsposition wird durch das Drücken der „Abgabe“-Taste bestätigt, woraufhin der nächste zu kommissionierende Artikel erscheint. Die Identifizierung des Lager- und Ablageplatzes erfolgt wie auch bei der Kommissionierliste und beim Pick-by-Voice-System mit Hilfe der numerischen Fachkennzeichnung über die drei Lagerkoordinaten (siehe Kap. 8.2.2).

### **Pick-by-Voice**

Die Realisierung dieses Systems erfolgte ebenfalls als eigenentwickelte Lösung, da die Umsetzung einer industrietauglichen Lösung die Einbindung eines – im Labor nicht vorhandenen – WMS erfordern würde. Zudem sind auch bei diesem Verfahren die Anschaffungskosten (ca. 100 €), der Einrichteaufwand, aber vor allem die Anforderungen an die Bedienung bei einer eigenentwickelten Lösung deutlich niedriger, als die Lösungen von verschiedenen Industrianbietern.

Realisiert wurde das Pick-by-Voice-System mit Hilfe eines Bluetooth-Headsets (siehe Abbildung 72), welches Sounddateien über einen Kopfhörer empfängt, sowie eines Notebooks, das als Steuereinheit dient. Für die Auswahl eines geeigneten Headsets waren folgende Kriterien von Bedeutung: Die Akkulaufzeit sollte mindestens fünf Stunden betragen, das Gewicht



Abbildung 72: Experimenteller Aufbau des Pick-by-Voice-Systems

möglichst gering sein, die Reichweite trotz Hindernissen mindestens 20 m betragen, eine Lautstärkeregelung am Gerät möglich sein, die Ausführung möglichst robust und kompakt sein. Zudem soll die Nutzung auch für Brillen- und Helmträger möglich sein und das Gerät nur eine Ohrmuschel aufweisen, um Umgebungsgeräusche noch wahrnehmen zu können.

Die Auswahl eines geeigneten Headsets erfolgte über einen paarweisen Vergleich mit anschließender Nutzwertanalyse. Dabei fiel die Entscheidung auf die In-Ear-Variante „Jabra Motion UC“.

Zur Durchführung der Studie mit dem Pick-by-Voice-System sind in einer Übersicht auf dem Bildschirm des Notebooks das Regal, der Wagen, die einzelnen Prozessschritte und ein -ablauf dargestellt. Für jedes Regalfach, jeden Ablageort und Prozessschritt ist eine Sounddatei mit einer Sprachanweisung hinterlegt. Die Sprachanweisung enthält die Informationen des Zielortes und der auszuführenden Handlung wie z.B. „Bitte Kiste aus null-zwei, null-fünf, null-drei entnehmen“, wobei die Identifizierung des Zielortes über die in Kapitel 8.2.2 beschriebene Lagerortkennzeichnung erfolgt. Die nachfolgende Handlung lautet: „Bitte legen Sie die Kiste auf den Wagen in W, null-eins, null-zwei, null-zwei“.

Die vermittelten Informationen via Sprachanweisung orientieren sich dabei an den Lagernummern, die auch bei Pick-by-Paper verwendet werden. Die Unterscheidung zwischen Einzelteil- und Gesamtbehälterentnahme erfolgt durch die Nennung der Entnahme einer „Kiste“ oder von beispielsweise „neun Stück“. Zusätzlich erhält der Versuchsteilnehmer bei der Einzelteilentnahme die Sprachanweisung für das Aufnehmen und Abstellen einer leeren Kiste auf der Waage.



Ein Bediener übernimmt die kontrollierte Steuerung anhand des Prozessablaufs nach dem Wizard-of-Oz-Prinzip. Die Versuchsteilnehmer müssen jeden Kommissionierschritt mit einem „OK“ und dem Nennen der Prüfziffer, die neben der Lagernummer befestigt wird, bestätigen. Außerdem haben die Versuchsteilnehmer die Möglichkeit, durch die Sprachanweisung „Wiederholen“ die zuletzt abgespielte Sprachanweisung erneut abspielen zu lassen oder durch die Aussage „Zurück“ eine Sprachanweisung zurück zu gehen.

### **Pick-by-Projection**

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Assistenzsystem wird aufgrund der eingesetzten Informationsbereitstellungsart mittels Projektion als Pick-by-Projection bezeichnet und ist in Abbildung 73 als experimenteller Aufbau in der Laborumgebung umgesetzt.

Eine nähere Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise sind in Kapitel 7 dargestellt.



Abbildung 73: Experimenteller Aufbau des Pick-by-Projection-Systems

## **8.3 Durchführung der Evaluierungen**

Nachdem in den vorhergehenden Kapiteln die Vorbereitungen und der Aufbau für die Evaluierungen detailliert beschrieben wurden, wird im Folgenden die Vorgehensweise bei der Durchführung erläutert.

Zwei Wochen vor Beginn der Versuchsdurchführung der ersten Studie wurde mit drei normal leistungsfähigen Experten und einer leistungsgeminderten Person eine heuristische Evaluation (siehe Kap. 8.1.2) durchgeführt (siehe Abbildung 63). Dieser Pretest sollte etwaige Fehler und Probleme aufdecken und sicherstellen, dass die technischen Kommissioniersysteme robust arbeiten, sich die zeitliche Versuchsdurchführung im geplanten Rahmen bewegt und der Versuchsablauf – mit der Einweisung, dem Probelauf und dem Ausfüllen von Fragebögen – verständlich und widerspruchsfrei verläuft. Zudem sollen die Mitglieder des Studienteams durch die Vorversuche Erfahrungen in ihren Zuständigkeitsbereichen sammeln und so Routine gewinnen.

Für die Generierung von validen Ergebnissen ist es wichtig, dass die Versuchsdurchführung für jeden Versuchsteilnehmer unter gleichen Voraussetzungen und Vorgaben sowie mit identischem Ablauf erfolgt. Als Hilfestellung wurde dafür eine Checkliste erstellt, welche gleichzeitig als Leitfaden für die Vorgaben und Anweisungen an die Versuchsteilnehmer dient und das Vorgehen zur Versuchsdurchführung detailliert beschreibt (siehe Anhang S. 180).

Im Folgenden wird die Durchführung der drei Evaluierungen (siehe auch Abbildung 63)

- als erstes mit normal leistungsfähigen Menschen (erste Vorstudie als Usability Test und Wizard-of-Oz-Lösung, siehe Kap. 9.2.1),
- als zweites mit leistungsgeminderten Menschen (zweite Vorstudie als Usability-Test und Wizard-of-Oz-Lösung, siehe Kap. 9.2.2) und
- als drittes nach Einarbeitung der Erkenntnisse aus den ersten beiden Studien mit einem überarbeiteten, fertig entwickelten und voll funktionsfähigen Assistenzsystem als Laboruntersuchung (siehe Kap. 9.3)

näher vorgestellt.

Die Versuchsdurchführung und der Ablauf der drei Evaluierungen waren jeweils identisch. Eine vereinfachte grafische Übersicht des Versuchsablaufs ist in Abbildung 74 zu sehen.

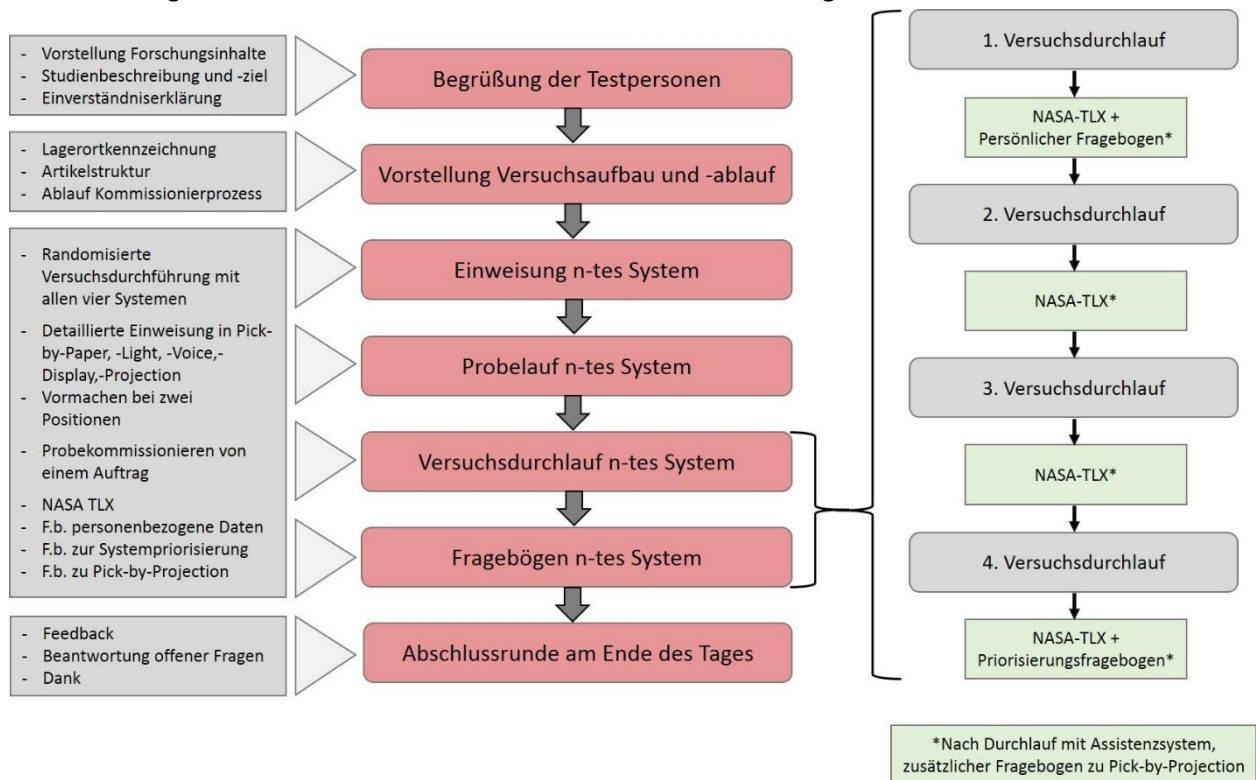


Abbildung 74: Übersicht des Versuchsablaufs der drei Evaluierungen des Gesamtsystems

Die Studienunterlagen variieren minimal in Umfang und Form. Die zeitliche Dauer von drei Tagen pro Versuchsreihe ist bei allen drei Studien identisch, ebenso die geplante Anzahl von 24 Versuchsteilnehmern pro Studie.

Wie bereits in Kapitel 8.2.1 beschrieben, finden die Erhebungen in der Laborumgebung eines Forschungsbereiches statt (siehe Abbildung 66).

Zur Durchführung der ersten Studie wurde ein Tagesplan erstellt und den im Vorfeld akquirierten Teilnehmern ein Termin mit entsprechender Uhrzeit zugewiesen.

Für die zwei weiteren Studien bedeutet die Laboruntersuchung, dass täglich acht leistungsgeminderte Menschen und eine Betreuungsperson aus der WfbM für die Versuche anreisen. Nach der Begrüßung der Versuchsteilnehmer wurde ihnen die bereits in der Werkstatt vorgestellten Forschungsinhalte und -ziele erneut vorgestellt (siehe auch Kap. 8.1.7). Anschließend folgte eine ausführliche Beschreibung der Studie mit der Vorstellung des Versuchsaufbaus und -ablaufs sowie der Aufklärung über die Teilnehmerrechte.

Im Anschluss an die Begrüßung und Einweisung startet der erste Versuchsteilnehmer mit der Durchführung der Kommissionierung (siehe Abbildung 75).

Die sieben wartenden Versuchsteilnehmer werden in einen Aufenthaltsraum gebracht und dort von einer pädagogischen Fachkraft betreut. Dort stehen Getränke und Snacks bereit, ein Angebot an verschiedenen Gemeinschaftsspielen sowie die Möglichkeit zur Filmvorführung. Zudem wird für Interessierte eine Führung über den Campus angeboten.

Neben der Gruppeneinweisung muss jeder Versuchsteilnehmer vor dem ersten Versuchsdurchgang eine Einverständniserklärung ausfüllen. Anschließend erfolgt vor dem jeweiligen Versuchsdurchlauf eine detaillierte Einzeleinweisung, in der das entsprechende Kommissioniersystem erläutert, ein



Abbildung 75: Versuchsdurchführung des Kommissionierprozesses

Versuchsdurchlauf mit zwei Positionen vorgeführt, ein Probelauf mit einem Auftrag durchgeführt und etwaige Fragen beantwortet werden<sup>33</sup>.

Die Reihenfolge der Systeme bei der Versuchsdurchführung wird randomisiert, um zu verhindern, dass ein System durch den Lerneffekt des vorangegangenen Kommissioniersystems profitiert. Dies bedeutet, dass jeder der 24 Versuchsteilnehmer die Systeme in anderer Reihenfolge durchtestet. Die Zuordnung der 24 verschiedenen Anleitungsreihenfolgen auf einen der Versuchsteilnehmer erfolgt per Zufall durch Auslosung (siehe Kap. 8.1.2 und Abbildung 62).

Im Anschluss an die Einweisung und den Probelauf startet der jeweilige Versuchsteilnehmer mit der Kommissionierung von 28 Artikeln aus sechs verschiedenen Lagerkanälen an drei Entnahmepositionen. Der Kommissionierwagen muss dabei immer zur jeweils folgenden Entnahmeposition mitgeschoben werden und darf nicht an einem Ort stehen gelassen werden. Die Versuchsdurchführung startet und endet jeweils in einer gekennzeichneten Fläche, in der zu Beginn auch der Kommissionierwagen bereitsteht (die Markierung erfolgt durch auf den Boden aufgeklebte Fußabdrücke).

Nach jedem Versuchsdurchlauf wird mit dem jeweiligen Versuchsteilnehmer der Fragebogen zur subjektiv erlebten Beanspruchung ausgefüllt (siehe Abbildung 76). Nach dem ersten Versuchsdurchlauf wird zusätzlich zum TLX- der persönliche Fragebogen ausgefüllt. Des Weiteren wird im Anschluss an den Versuchsdurchlauf mit dem Pick-by-Projection-System der Fragebogen zur Bewertung dieses Assistenzsystems gestellt.



Abbildung 76: Ausfüllen der Fragebögen mit Unterstützung durch einen Versuchsleiter

<sup>33</sup> Die Einweisung orientiert sich an der Vier-Stufen-Methode von REFA (Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung), bei der der Mitarbeiter mit dem Unterweiser folgende Stufen durchläuft: 1. Stufe: Vorbereiten und erklären, 2. Stufe: Vormachen und erklären, 3. Stufe: Nachmachen und erklären lassen, 4. Stufe: Vertiefen (vgl. REFA 1991).

Als letzter Teil der Befragung werden nach Abschluss des vierten Versuchsdurchlaufs einige Fragen zur Priorisierung der vier Systeme gestellt (nähere Informationen zu den einzelnen Erhebungsinstrumenten siehe Kap. 8.1.6).

Die Erfassung der logistischen Kennzahlen der Kommissionierfehler und der -zeit erfolgt parallel zur Versuchsdurchführung auf Datenblättern.

Während die Versuchsteilnehmer mit einem Mitarbeiter des Studienteams die Fragebögen ausfüllen, werden von den beiden anderen Studienmitarbeitern die kommissionierten Artikel kontrolliert, Fehler erfasst und die Artikel wieder zurück ins Lager geräumt. Zudem wird der Kommissionierwagen an die Startposition zurückgebracht und das Kommissionierverfahren für den nachfolgenden Durchgang vorbereitet.

Am Ende eines jeden Versuchstages findet gemeinsam mit den Versuchsteilnehmern eine Abschlussrunde statt, in der die Teilnehmer Feedback äußern können, offene Fragen der Teilnehmer beantwortet werden und ein Dank an die Teilnehmer ausgesprochen wird.

## 9 Evaluierungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Untersuchungen mit dem Assistenzsystem für Kommissionierprozesse (siehe Kap. 7) unter Einbeziehung der in Kapitel 8.1.4 formulierten Hypothesen ausgewertet, vorgestellt sowie diskutiert.

Hierfür werden die erhobenen Kennzahlen wie die Kommissionierzeit, die -fehlerrate sowie die subjektive Beanspruchung anhand statistischer Methoden systematisch ausgewertet. Zur Auswertung der erhobenen Daten und Überprüfung der Hypothesen wurden die Softwareprogramme MS Excel und IBM SPSS Statistics 22.0 sowie Fachliteratur, primär von Bortz und Döring (vgl. Bortz und Döring 2009) und Eid (vgl. Eid et al. 2013), eingesetzt.

Aufgrund des großen Umfangs werden in der vorliegenden Arbeit lediglich die Ergebnisse der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen und dem autark funktionsfähigen Assistenzsystem (siehe Kap. 9.3) ausführlich dargestellt. Die Ergebnisse der ersten und zweiten Vorstudie werden aus Relevanzgründen lediglich in Auszügen vorgestellt, insoweit sich daraus Optimierungs- und Gestaltungspotenziale ergeben haben (siehe Kap. 9.2.3), die für die Durchführung der Hauptstudie bedeutsam sind.

### 9.1 Vorgehensweise zur statistischen Auswertung der Kommissionierstudien

Die Auswertung und Strukturierung der erhobenen Daten erfolgt in zwei Stufen (siehe Abbildung 77). In einem ersten Schritt werden dabei im Zuge der **deskriptiven Statistik**<sup>34</sup> zur Strukturierung des Datensatzes die **Lagemaße** (arithmetisches Mittel, Median<sup>35</sup>, Minimum, Maximum, erstes Quartil<sup>36</sup>, drittes Quartil<sup>37</sup>) sowie die **Streuemaße** (Spannweite, Standardabweichung und Interquartilsabstand) ermittelt und in grafischer Form als **Box-Whisker-Plot**<sup>38</sup> dargestellt (vgl. Eid et al. 2013; Sudhop und Reber 2004).

Um mit den Daten der vorliegenden Stichproben von jeweils 24 Versuchspersonen auf die Grundgesamtheit schließen zu können, werden in einem zweiten Schritt verschiedene Testverfahren der **induktiven Statistik** (auch *schließende*, *analytische* Statistik oder *Inferenzstatistik* genannt)

<sup>34</sup> Die deskriptive Statistik (auch *beschreibende* oder *empirische* Statistik genannt) fasst verschiedene Methoden zur Beschreibung und standardisierten Auswertung von Daten zusammen, wobei ausschließlich Aussagen zum Datensatz gemacht werden. Dies bedeutet, dass die Parameter wie der Mittelwert oder die Standardabweichung bei einer Untersuchung nur das beschreiben, was auf die Versuchsteilnehmer selbst zutrifft, aber nicht, ob von diesen auf die Grundgesamtheit gefolgert werden kann. Die Stichprobenergebnisse können zusätzlich zu den Kennwerten mit Grafiken und Tabellen veranschaulicht werden (vgl. Bortz und Döring 2009; Eid et al. 2013).

<sup>35</sup> Der Median wird auch als zweites Quartil bezeichnet. Er teilt die vorliegenden Messwerte in eine obere und eine untere Hälfte. Der Vorteil dieses Wertes gegenüber dem arithmetischen Mittel ist, dass er unempfindlicher gegen besonders kleine oder große Messwerte bzw. robust gegen *Ausreißer* oder *Extremwerte* (Definitionen siehe nachfolgende Seite) ist (vgl. Roach 2014; Eid et al. 2013).

<sup>36</sup> Das erste Quartil gibt den Wert an, der von mindestens 25 % aller Messwerte unterschritten oder erreicht bzw. von mindestens 75 % aller Messwerte erreicht oder überschritten wird (vgl. Eid et al. 2013).

<sup>37</sup> Das dritte Quartil gibt den Wert an, der von mindestens 75 % aller Messwerte unterschritten oder erreicht bzw. von mindestens 25 % aller Messwerte erreicht oder überschritten wird (vgl. Eid et al. 2013).

<sup>38</sup> Ein Box-Whisker-Plot (auch Boxplot genannt) ist ein grafisches Hilfsmittel zur Darstellung der Lage und Streuung eines Datensatzes. Er besteht aus einem Kasten („Box“) und zwei Linien bzw. „Schnurrhaaren“ (engl. „Whisker“). Das untere Kastenende wird durch das erste Quartil und das obere Kastenende durch das dritte Quartil festgelegt. Die Höhe des Kastens nennt man Interquartilsabstand. Ein waagrechter Strich innerhalb des Kastens kennzeichnet den Median der Verteilung. Die zwei Whisker geben an, wie weit die beobachteten Werte streuen. Der untere Whisker wird durch das Minimum und der obere durch das Maximum bzw. der Abstand dazwischen durch die Spannweite bestimmt (vgl. Burkschat et al. 2012; Eid et al. 2013).

eingesetzt. Mit ihrer Hilfe wird überprüft, ob mit einer relativ geringen Anzahl von Beobachtungswerten allgemeingültige Aussagen über die untersuchte Grundgesamtheit getroffen werden können bzw. ob die Ergebnisse der vorliegenden Stichprobe zu einer Annahme oder Ablehnung der Alternativhypothesen in Bezug auf die Grundgesamtheit führen (vgl. Bortz und Döring 2009). Für die Durchführung von statistischen Hypothesentests (Signifikanztests) wird hierzu in der vorliegenden Arbeit ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  zugrunde gelegt (siehe Kap. 8.1.4). Als Voraussetzung für die Auswahl und die Durchführung der Hypothesentests wird zu Beginn der induktiven Statistik eine explorative Datenanalyse<sup>39</sup> durchgeführt, denn viele Signifikanztests gehen von der Annahme aus, dass die Werte der einzelnen Variablen (in der Grundgesamtheit) und Stichproben z.B. normalverteilt sind, homogene Varianzen<sup>40</sup> aufweisen und keine Ausreißer oder Extremwerte beinhalten (vgl. Brosius).

Im Zuge dieser explorativen Datenanalyse wird zuallererst die Verteilung der einzelnen Stichproben ermittelt, denn laut dem zentralen Grenzwerttheorem geht die Verteilung von Mittelwerten (aus Stichproben mit dem Umfang  $N$ ) einer Grundgesamtheit mit zunehmender Anzahl von Stichproben in eine Normalverteilung über. Diese Annahme kann jedoch erst ab einer Stichprobengröße von  $N \geq 30$  getroffen werden (vgl. Bortz und Döring 2009; Bortz und Lienert 2008).

Im vorliegenden Fall ist dies aufgrund des Stichprobenumfangs von 24 Versuchsteilnehmern nicht zutreffend, weshalb eine Prüfung auf **Normalverteilung** erforderlich wird. Zwar kann laut Günthner et al. bei Kommissionierzeiten meist davon ausgegangen werden, dass diese normalverteilt sind (vgl. Günthner et al. 2009), bei Kommissionierfehlern hingegen liegt in der Regel **keine Normalverteilung**, sondern eine Poissonverteilung vor, da die Fehleranzahl nur ganzzahlige nicht-negative Werte annimmt und Fehler an sich eher „seltene Ereignisse“ sind (vgl. Lolling 2003; Hartung et al. 2002; Arnold und Furmans 2009). Aus diesen Gründen wird bei allen abhängigen Variablen eine Prüfung der Normalverteilung mit dem verteilungsfreien **Kolmogorov-Smirnov-Test** (KS-Test) mit Lilliefors-Korrektur durchgeführt. Dieser Test gilt laut Eid et al. selbst bei kleinen Stichproben als robust (vgl. Eid et al. 2013).

Je nach Ergebnis des KS-Tests werden für die Überprüfung auf Unterschiede bei Mittelwerten bei vorliegender Normalverteilung **parametrische Verfahren** oder bei nicht vorliegender Normalverteilung **verteilungsfreie Verfahren** unterschieden. Die weitere Auswahl der verschiedenen Signifikanztests erfolgt dann anhand der jeweiligen Testsituation nach der Form der Messwiederholung (abhängige vs. unabhängige Stichproben) sowie nach der Anzahl der Stichproben. Im vorliegenden Fall sind dies aufgrund eines within-subjects-design (siehe Kap. 8.1.2) für die Form der Messwiederholung die Testverfahren mit abhängigen Stichproben. Als parametrisches Verfahren zur Testung auf Signifikanz der Mittelwerte der vier abhängigen Stichprobengruppen wird die **einfaktorielle Varianzanalyse** (auch ANOVA genannt) **mit Messwiederholung** eingesetzt (vgl. Eid et al. 2013). Als parametrisches Verfahren bei zwei abhängigen Stichproben wird der **t-Test für abhängige Stichproben** verwendet (vgl. Eid et al. 2013).

---

<sup>39</sup> Die explorative Datenanalyse stellt eine methodische Zwischenform der deskriptiven und induktiven Statistik dar. Sie versucht mittels deskriptiver (wie z.B. Box-Whisker-Plots) und induktiver Methoden (z.B. verschiedene Testverfahren) Besonderheiten, Zusammenhänge, Strukturen und Muster in den Daten zu finden und dadurch neue Wirkzusammenhänge zu erforschen (vgl. Ballke 2011; Polasek 1994; Tukey 1977; Mosteller und Tukey 1977; Steland 2013; Weiß 2007).

<sup>40</sup> Da die Stichproben im vorliegenden Fall abhängig sind, kann davon ausgegangen werden, dass bereits homogene Varianzen vorliegen, weshalb keine Testung auf Varianzhomogenität erforderlich ist.

Als verteilungsfreies Verfahren für die Testung auf Unterschiede bei Mittelwerten wird für alle vier abhängigen Stichproben die **Rangvarianzanalyse nach Friedman** (auch Friedman-Test genannt) und für zwei Stichproben der **Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest** eingesetzt (vgl. Eid et al. 2013).

Die beiden Testverfahren – ANOVA und Friedman-Test – überprüfen die Auswirkungen einer gestuften, unabhängigen Variablen (im vorliegenden Fall die Variable des Anleitungssystems mit den vier Faktorstufen Pick-by-Paper, -Light, -Display bzw. -Voice und -Projection) auf eine abhängige Variable (Kommissionierzeit oder -fehlerrate oder subjektive Beanspruchung, siehe dazu auch Kap. 8.1.2) (vgl. Bortz und Schuster 2010). Durch diese beiden Tests kann jedoch nur festgestellt werden, ob es Unterschiede zwischen den Stichproben bzw. Faktorstufen gibt. Sie geben keinen Aufschluss darüber, welche der verglichenen Faktorstufen sich wie zueinander unterscheiden (vgl. Roach 2014). Hierfür werden anschließend die vier Faktorstufen jeweils paarweise entweder mit dem t-Test für abhängige Stichproben oder mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest auf Signifikanz getestet.

Einzelne Werte der Stichproben können aus verschiedenen Gründen **Ausreißer**<sup>41</sup> oder Extremwerte<sup>42</sup> darstellen. Diese erschweren die Überprüfung von Hypothesen und können das Ergebnis von Signifikanztests verfälschen bzw. maßgeblich beeinflussen. Aus diesen Gründen werden die Stichproben mittels einer grafischen Prüfung durch Box-Whisker-Plots auf Ausreißer und Extremwerte kontrolliert. Die Identifikation und Kennzeichnung durch die Statistik-Software SPSS erfolgt dabei durch einen Stern für Extremwerte bzw. durch einen Kreis für Ausreißer, jeweils unter Angabe der Nummer des Untersuchungssubjektes in der Stichprobe. Wenn Ausreißer oder Extremwerte in einer Stichprobe vorliegen, muss überprüft werden, ob diese sinnvoll interpretiert werden können oder ob sie z.B. aufgrund von Eingabefehlern oder aufgrund einer unsorgfältigen Teilnahme eines Versuchsteilnehmers entstanden sind und somit aus dem Datensatz entfernt und aus der Datenanalyse ausgeschlossen werden müssen (vgl. Eid et al. 2013). Im Zweifelsfall sollten bei der anschließenden Auswahl der Signifikanztests statt der parametrischen verteilungsfreie Tests ausgewählt werden, da diese nicht anfällig gegen Ausreißer sind (vgl. Bortz und Lienert 2008).

Eine Übersicht der Vorgehensweise zur Auswertung der Untersuchungen ist in Abbildung 77 dargestellt.

---

<sup>41</sup> Ausreißer sind Werte, welche mehr als das 1,5-fache der Boxlänge (oberes – unteres Quartil) unterhalb des unteren bzw. oberhalb des oberen Quartils entfernt liegen (vgl. Eid et al. 2013).

<sup>42</sup> Extremwerte sind Ausreißer, welche besonders weit von der Box abweichen. Sie müssen laut Definition mindestens drei Boxlängen oberhalb des oberen oder unterhalb des unteren Quartils liegen (vgl. Eid et al. 2013).



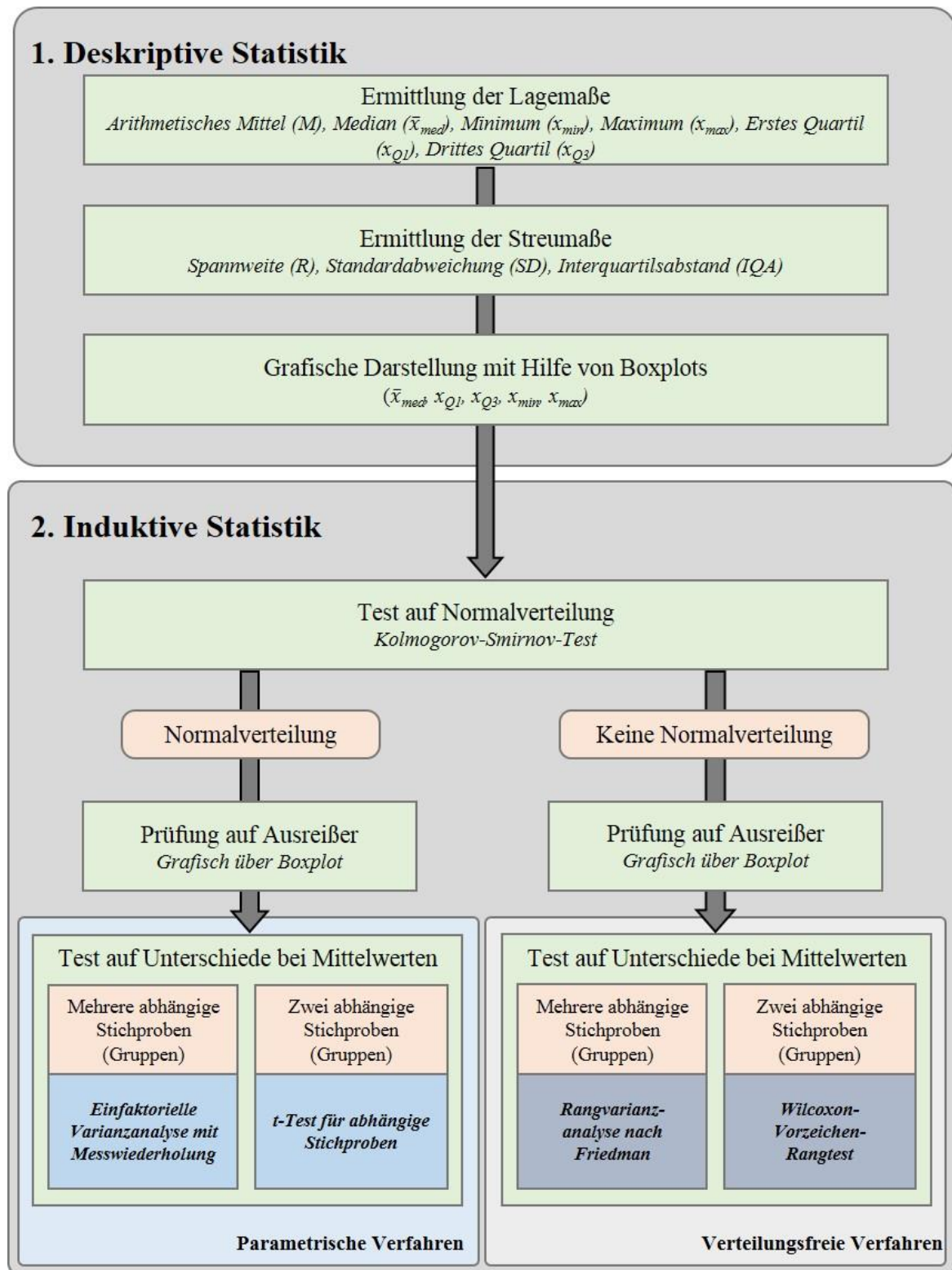


Abbildung 77: Vorgehensweise für die statistische Auswertung der Kommissionierstudien



## 9.2 Vorstudien zur Ableitung von Gestaltungs- und Optimierungspotenzialen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zwei empirischen Voruntersuchungen (zuerst mit normal leistungsfähigen Menschen und anschließend mit der potenziellen Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen, beide im Wizard-of-Oz-Verfahren) erläutert. Das Ziel der Voruntersuchungen ist es, Mängel und Verbesserungspotenziale aufzudecken, die anschließend behoben werden sollen, um das Assistenzsystem als selbstständig funktionierendes System zu realisieren und damit die abschließende dritte Evaluierung erfolgreich durchführen zu können.

### 9.2.1 Erste Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen

Diese Studie ist die erste Evaluierung des Prototyps eines Assistenzsystems für manuelle Kommissionierprozesse. Die Untersuchung fand im Dezember 2014 mit 24 normal leistungsfähigen Personen als formative und analytische Usability-Evaluation statt (siehe Kap. 8.1.1). Dabei testeten pro Tag acht Versuchsteilnehmer, mehrheitlich Mitarbeiter und Studenten der Hochschule, die Systeme. Die Versuchsdurchführung ist nahezu dieselbe wie in den nachfolgenden Studien mit der Zielgruppe der leistungsgeminderten Menschen. Die Ergebnisse wurden auf der „*Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2016*“ (vgl. Baechler et al. 2016a) veröffentlicht. Deshalb werden sie nachfolgend nur in gekürzter Form dargestellt, diskutiert und Optimierungspotenziale abgeleitet, um diese ggf. für die abschließende Evaluierung zu übernehmen.

#### **Ergebnisse und Diskussion**

Die Hauptergebnisse der drei erfassten abhängigen Variablen (Kommissionierzeit, -fehlerrate<sup>43</sup> und subjektive Beanspruchung) in Bezug auf die vier Kommissionierverfahren (jeweils von links: Pick-by-Paper, -Light, -Display und -Projection) sind in Abbildung 78, Abbildung 79 und Abbildung 80 dargestellt.

Die Auswertungen der ersten Vorstudie zeigen auf der einen Seite, dass die Versuchsteilnehmer mit Pick-by-Projection weniger Fehler machen als bei allen übrigen Verfahren (siehe Abbildung 79). Auf der anderen Seite ist für Pick-by-Projection im Vergleich zu Pick-by-Light ein Anstieg der Kommissionierzeit (siehe Abbildung 78) sowie eine erhöhte subjektive Beanspruchung (siehe Abbildung 80) zu erkennen.

#### *Kommissionierzeit*

Die verhältnismäßig hohe Kommissionierzeit für Pick-by-Projection kann verschiedene Gründe haben. Zum einen beinhaltete die Anleitung von Pick-by-Projection (neben der in situ-Projektion) zusätzlich die Einblendung von Videos auf dem Touchscreen, die eine Abspieldauer von mehreren Sekunden pro anzuleitenden Prozessschritt hatten. Da die Mehrheit der Versuchsteilnehmer diese Videos betrachten und mental verarbeiten mussten, bevor sie mit der tatsächlichen Ausführung der Kommissioniertätigkeiten beginnen konnten, führte dies zu einer deutlichen Verlängerung der Kommissionierzeiten bei einer Anleitung durch Pick-by-Projection.

Darüber hinaus wurde bei den drei gängigen Kommissionierverfahren (Pick-by-Paper, -Light und -Display) häufig der Wiegeprozess vergessen. Für das Verfahren Pick-by-Projection, bei dem dieser Prozessschritt immer durchgeführt wurde, bedeutet diese Kontrolltätigkeit des Abstellens und Wiederaufnehmens eines Behälters auf der Waage einen zusätzlichen Zeitaufwand.

---

<sup>43</sup> Die Kommissionierfehlerrate errechnet sich aus dem Verhältnis der Fehleranzahl pro Versuchsdurchgang zur Anzahl der insgesamt kommissionierten Artikel, im vorliegenden Fall 28 Einzelteile (siehe Kap. 8.1.6).

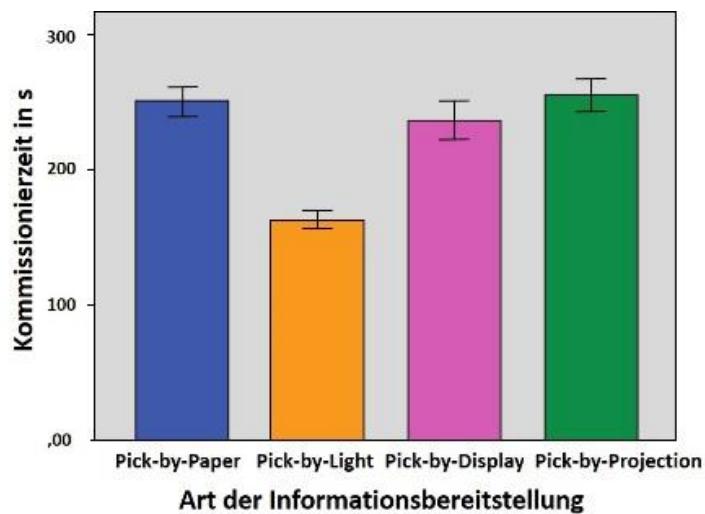


Abbildung 78: Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der Kommissionierzeit der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a)

Das Vergessen des Wiegeprozesses wurde zwar mit einem Fehler bewertet, gleichzeitig wurde jedoch eine Zeitersparnis von rund sieben Sekunden pro vergessenem Wiegeprozess erreicht.

Des Weiteren hatten die Versuchsteilnehmer in dieser ersten Studie nicht die Verpflichtung, den Kommissionierwagen während des Versuchsdurchlaufs mit zu verschieben. Einzig bei der Kommissionierung mit Pick-by-Projection war ein Mitschieben des Wagens für die Projektionsanleitung erforderlich. Dies führte dazu, dass die Versuchsteilnehmer bei der Kommissionierung mit den drei anderen Verfahren den Wagen stehen ließen und so kürzere Verschiebe- bzw. Kommissionierzeiten erreichten. In der Praxis wäre das jedoch aufgrund der großen Distanzen zwischen den Entnahmeorten nicht möglich.

Die meisten Fehler, die während der Kommissioniertätigkeiten mit Pick-by-Light, -Paper und -Display gemacht wurden, waren Entnahmefehler. Der häufigste Entnahmefehler war, dass die Versuchsteilnehmer statt der Entnahme von einzelnen Artikeln den gesamten Behälter entnommen haben. Diese Vorgehensweise wurde in der Datenerhebung mit einem Fehler erfasst, führte aber gleichzeitig zu einer Reduzierung der Prozess- und Kommissionierzeiten um einige Sekunden. Der Kommissioniervorgang von neun Einzelteilen dauert im Durchschnitt 27 Sekunden, falls der Versuchsteilnehmer aber statt der Entnahme und dem Ablegen der Einzelteile den gesamten Behälter entnimmt, werden im Schnitt nur fünf Sekunden benötigt. Dies bedeutet eine Zeitersparnis von 22 Sekunden, wogegen die Fehlerrate nur um einen Fehler ansteigt.

Bei der fehlerhaften Ausführung eines Kommissioniervorgangs bietet das Pick-by-Projection-System eine Fehlerrückmeldung (die Anleitung wird erneut angezeigt). Diese Funktionalität verhindert auf der einen Seite Prozessfehler, führt aber gleichzeitig durch die zusätzliche Informationsdarbietung, die nötige kognitive Verarbeitung und den anschließenden Korrekturvorgang zu einer höheren Ausführungszeit.

Eine weitere Ursache für die hohe Kommissionierzeit bei Pick-by-Projection liegt im Wizard-of-Oz-Prinzip, da die Reaktionszeiten für einzelne Ausführungstätigkeiten der Versuchsteilnehmer bei dieser Technik stark bedienerabhängig sind. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren verursacht der Bediener eine leichte Verzögerung der Kommissionierprozesse und damit auch der -zeit.

### Kommissionierfehlerrate

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass mit der Kommissioniermethode Pick-by-Projection die geringste Fehlerquote ( $M = 1,04\%$ ) erreicht wird. Obwohl der Unterschied der verschiedenen Systeme – bezogen auf die verursachten Fehler – statistisch nicht signifikant ist, kann ein Trend beobachtet werden. Dieser Trend ist vor allem für die Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen von Bedeutung. Bei der Nutzung des Assistenzsystems mit dieser Personengruppe ist es von größerer Bedeutung, Fehler zu vermeiden und zu verhindern, als eine möglichst kurze Kommissionierzeit zu erreichen.

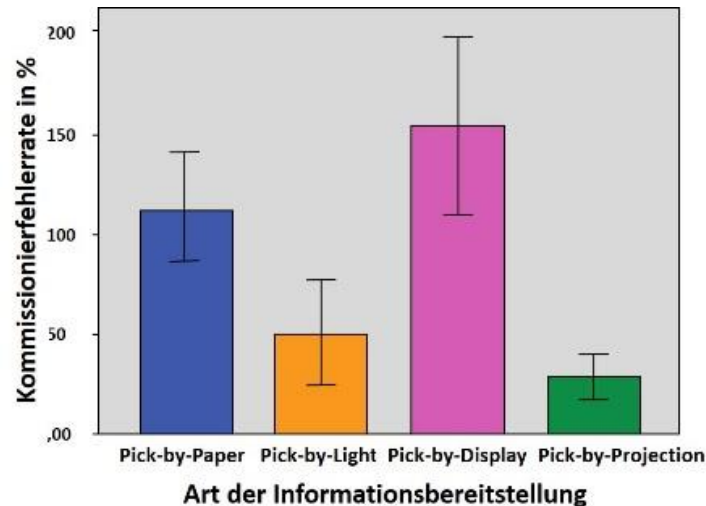


Abbildung 79: Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der Kommissionierfehlerrate der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a)

Die stark reduzierte Fehlerrate des Assistenzsystems im Vergleich zu den anderen Systemen kann unterschiedliche Ursachen haben: So führt zum einen die prozessintegrierte, nutzerspezifische und flexibel gestaltbare Anleitung zu einem leichteren und besseren Verständnis und dadurch zu einer Vermeidung von Unklarheiten sowie fehlerhaften Prozessvorgängen. Zum anderen wird mit der integrierten Fehlerrückmeldung, z.B. über rot blinkende Balken bei einem Griff in das falsche Entnahme- oder Ablagefach, aber auch eine zusätzliche Information geboten, die es ermöglicht, aufgetretene Fehler zu beheben. Die flächenmäßig große Darstellung der Anleitung auf den Projektionswinkeln ermöglicht zusätzlich eine bessere Erkennbarkeit und Wahrnehmung gegenüber den Verfahren Pick-by-Light, -Display und -Paper. Zudem verhindern die direkt am Ort der Entnahme oder Ablage (in situ) projizierten Anleitungen ein Verrutschen oder Verwechseln der Entnahme- oder Ablageorte (Typfehler) gegenüber den Verfahren Pick-by-Display und -Paper.

Trotzdem sind die verzeichneten Werte für die Fehlerraten mit  $M = 4,03\%$  für Pick-by-Paper, mit  $M = 1,79\%$  für Pick-by-Light und  $M = 5,5\%$  für Pick-by-Display deutlich höher als in der industriellen Praxis üblich. In der Praxis liegt beispielsweise die Fehlerrate für die Anleitung mittels einem Handheld, das mit dem Pick-by-Display-Verfahren der vorliegenden Arbeit vergleichbar ist, bei einem Wert von  $0,69\%$  (vgl. Lolling 2003). Der Wert der vorliegenden Studie hingegen liegt fast acht Mal höher.

Diese große Differenz kann verschiedene Ursachen haben: So waren bei der vorliegenden Untersuchung nur Laien im Einsatz, welche bisher keine Erfahrungen im Bereich der Kommissionierung hatten. Zusätzlich erstreckte sich die Studiendauer über einen verhältnismäßig geringen Zeitraum, weshalb eine Messung über einen längeren Zeitraum aufgrund der dann durchlaufenen Lernkurve eine geringere Fehlerrate erwarten lässt. Schlussendlich könnte das Wissen, an einer Untersuchung

teilzunehmen, bei vielen Teilnehmern Stress ausgelöst haben, der wiederum zu einem erhöhten Fehlerrisiko geführt haben könnte.

### *Subjektive Beanspruchung*

Die Ergebnisse der subjektiven Beanspruchung ergeben ebenfalls keinen signifikanten Unterschied der vier Kommissioniervarianten. Die Ergebnisse deuten jedoch auf einen Trend für eine geringere Beanspruchung bei Kommissionierung mit Pick-by-Light und -Projection hin. Dies könnte daran liegen, dass bei den Verfahren Pick-by-Paper und -Display die Versuchsteilnehmer in einem ersten Schritt der Kommissionierung den jeweiligen Lagerort anhand der (in Papierform oder auf dem Display abgebildeten) Lagerkoordinaten aufsuchen und identifizieren müssen. Der Lagerort wird nicht direkt über das Aufleuchten einer Signallampe oder über das Blinken eines projizierten Balkens erkennbar, wie dies bei den anderen beiden Systemen der Fall ist.

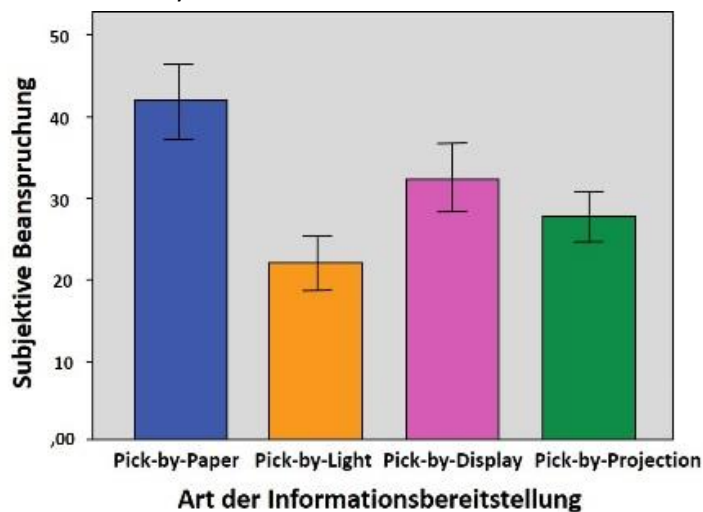


Abbildung 80: Balkendiagramm mit Standardfehler für die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des NASA-TLX der ersten Vorstudie mit normal leistungsfähigen Menschen (vgl. Baechler et al. 2016a)

Der Unterschied der Beanspruchung zwischen Pick-by-Light und -Projection könnte durch den verhältnismäßig hohen Informationsgehalt der Anleitung mit Pick-by-Projection bedingt sein. Bei der Anleitung nach dem Pick-by-Light-Prinzip wird durch das alleinige Aufleuchten der Signallampe und der Displayanzeige ein ausgewogenes Maß an leicht verständlichen und direkt am Ort des Geschehens dargestellten Informationen geboten. Bei Pick-by-Projection hingegen wird der Versuchsteilnehmer über zwei Informationskanäle bzw. -medien angeleitet: Zum einen mit Hilfe der in situ-Projektion und zum anderen mit Hilfe eines Touchscreens, der über Darstellungsformen per Text, Piktogramm, Bild oder Video zusätzliche Informationen abbildet.

Die Beobachtungen und Ergebnisse des Fragebogens zu Pick-by-Projection, in dem einige Versuchsteilnehmer das Display als störend bewerteten, zeigen, dass ein so hoher Informationsgehalt für normal leistungsfähige Menschen gar nicht erforderlich ist.

Durch die Vielzahl an Informationen und die Vielschichtigkeit dieser an unterschiedlichen Orten bzw. auf unterschiedliche Weise – per Lichtsignal, Piktogramm, Bild oder Video – bereitgestellten Informationen werden die Nutzer teilweise reizüberflutet, verwirrt und auch gestresst. Diese Problematik könnte zum einen über das Weglassen des Bildschirms als Informationsmedium bzw. über die Fokussierung auf die Projektion als Informationsmedium und zum anderen über die Entwicklung und Implementierung von Adaptivitätsstufen in das Pick-by-Projection-System verringert werden.

Ein weiteres Ergebnis des persönlichen Fragebogens ist, dass für das Verschieben der Assistenzeinheit Verbesserungspotenzial besteht. Hierfür könnte das Anbringen eines Griffes an der verschiebbaren Assistenzeinheit eine einfach und schnell zu realisierende Abhilfemaßnahme darstellen (siehe Kap. 9.2.3).

### **Sonstige Beobachtungen**

Vor allem bei älteren Versuchsteilnehmern (> 47 Jahre) sind größere Schwierigkeiten bei der Kommissionierung mit einer Anleitung per Papierliste oder Displayanzeige zu beobachten. Beim Einsatz dieser beiden Verfahren werden lange Zeitintervalle für das Aufsuchen der Lagerorte benötigt. Ebenso machen einige der Versuchsteilnehmer mit fortlaufender Kommissionierung einen nervösen und leicht gestressten Eindruck. Zusätzlich ist bei der Anleitung per Papierliste ein häufiges Überprüfen bzw. Abgleichen der Lagerkoordinaten auf dem Regal und der Papierliste festzustellen. Trotzdem zeigt die Fehlerauswertung, dass in einigen Fällen ein Verrutschen zwischen den einzelnen Zeilen (Auftragspositionen) der Liste stattgefunden hat.

Der subjektiven Wahrnehmung der Versuchsbetreuer nach, ist das Pick-by-Light-System für die normal leistungsfähigen Menschen das verständlichste und am schnellsten auszuübende Verfahren. Jedoch besteht bei diesem Verfahren ein erhöhtes Fehlerpotenzial, da die Displayanzeige nur die Stückzahl und nicht die zugrundeliegende Einheit anzeigt. Deshalb findet häufig eine Verwechslung zwischen der Gesamtbehälter- und der Einzelteilentnahme statt, obwohl bei der Einweisung explizit auf diese Thematik hingewiesen wurde.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Studien werden für die nachfolgende Untersuchung mit leistungsgeminderten Menschen keine Änderungen oder Optimierungen an den Systemen (bis auf den Wegfall der zusätzlichen Anleitungsförm per Video bei Pick-by-Projection) vorgenommen.

### **9.2.2 Zweite Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen**

Diese zweite Evaluierung zur Gebrauchstauglichkeit findet noch während der Entwicklungsphase im Januar 2015 mit dem Prototyp des Assistenzsystems, ebenfalls nach dem Wizard-of-Oz-Prinzip, statt. Im Gegensatz zur ersten Evaluierung wird dieser Usability-Test mit 24 Personen der zukünftigen Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen aus der kooperierenden WfbM durchgeführt. Der Ablauf und die Inhalte entsprechen der Versuchsdurchführung der vorhergehenden Evaluierung. Die Ergebnisse dieser Evaluierung wurden auf der „*International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP) 2016*“ von Baechler et al. veröffentlicht (vgl. Baechler et al. 2016b).

Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dieser zweiten Voruntersuchung in der vorliegenden Arbeit ebenfalls nur in Auszügen – insofern sie für das Verständnis der nachfolgenden Studie erforderlich und hilfreich sind – dargestellt und diskutiert. Abschließend werden daraus, gemeinsam mit den Ergebnissen der vorhergehenden Evaluierung, Gestaltungs- und Optimierungspotenziale für die Weiterentwicklung des Assistenzsystems abgeleitet.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Die Hauptergebnisse der drei erfassten abhängigen Variablen (Kommissionierzeit, -fehler und die subjektive Beanspruchung) in Bezug auf die vier Kommissionierv Verfahren (jeweils von links: Pick-by-Paper, -Light, -Display und -Projection) sind in Abbildung 81, Abbildung 82 und Abbildung 83 dargestellt.

Neben den bereits in der vorhergehenden Studie erwähnten Auffälligkeiten und Begründungen sind – bei Betrachtung der Ergebnisse – vor allem Veränderungen der Rangfolgen innerhalb der vier Kommissionierv Verfahren zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Versuchsteilnehmer mit Pick-by-Projection kaum Fehler machen (siehe Abbildung 82). Ebenso ist für Pick-by-Projection im Vergleich zu Pick-by-Light ein Anstieg der Kommissionierzeit (siehe Abbildung 81) sowie eine erhöhte subjektive Beanspruchung (siehe Abbildung 83) zu erkennen.

#### *Kommissionierzeit*

Im Vergleich zur ersten Voruntersuchung sind die absoluten Kommissionierzeiten für alle vier Verfahren um das Zwei- bis Dreifache angestiegen. Eine Testung auf Unterschiede der Mittelwerte mit dem Friedman-Test ergibt mit  $\chi^2(3) = 15,8$ ,  $p = 0,001$  ein hoch signifikantes Ergebnis. Zudem erreicht das Kommissionierverfahren Pick-by-Projection als zweitschnellstes Verfahren einen deutlich besseren Rang für die Ausführungszeit als bei der vorhergehenden Untersuchung mit normal leistungsfähigen Menschen.

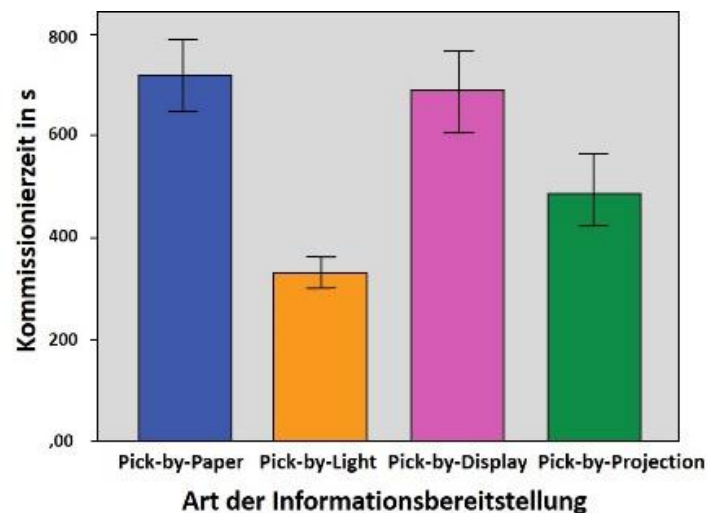


Abbildung 81: Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der Kommissionierzeit der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b)

Diese Veränderungen lassen sich auf verschiedene Gründe zurückführen: So lassen sich die insgesamt gestiegenen Kommissionierzeiten zum einen mit der Änderung der Nutzergruppe (leistungsgeminderte Versuchsteilnehmer) begründen. Zum anderen wurde bei dieser Studie aber auch die Informationsvermittlung und -darstellung für Pick-by-Projection dahingehend verändert, dass keine Videos mehr als Informationsmedium eingesetzt werden, was ebenfalls eine Verbesserung der Rangfolge für Pick-by-Projection bewirkt haben dürfte.

#### *Kommissionierfehlerrate*

Bei den Fehlerraten der vier Verfahren sind ebenfalls – mit Ausnahme von Pick-by-Projection – starke Anstiege zu erkennen. Die Rangfolge hingegen bleibt für Pick-by-Projection und -Light dieselbe. Zudem zeigt der Friedman-Test mit  $\chi^2(3) = 15,00$ ,  $p = 0,002$  ein sehr signifikantes Ergebnis für den Mittelwertsunterschied der Fehlerraten.

Die Anstiege der Fehlerraten bei der vorliegenden Evaluierung lassen sich primär auf die kognitive Einschränkung der Versuchsteilnehmer zurückführen. Gerade dadurch, dass bei den zwei gängigen Systemen (Pick-by-Paper und -Display) für das Verständnis der Systematik der Lagerkoordinaten und das Aufsuchen der entsprechenden Lagerorte eine hohe kognitive Leistungsfähigkeit erforderlich ist, zeigen sich nicht nur für die Kommissionierzeit, sondern auch für die Fehlerraten negative Auswirkungen.

Ansonsten hat wie bei allen drei Evaluierungen der relativ kurze Studienzeitraum sowie die mehrheitlich fehlende Erfahrung im Bereich der Kommissionierung – gerade bei der vorliegenden Zielgruppe der leistungsgeminderten Mitarbeiter – deutliche Auswirkungen auf die Ergebnisse.

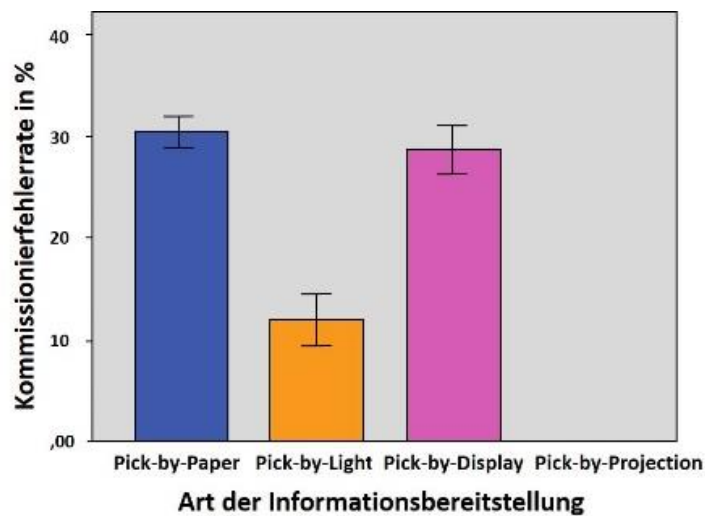


Abbildung 82: Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der Kommissionierfehlerrate der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b)

### Subjektive Beanspruchung

Aufgrund der unterschiedlichen Formen der verwendeten NASA-TLX (modifizierter NASA-TLX bei leistungsgeminderten und regulärer NASA-TLX bei normal leistungsfähigen Menschen) lassen sich die vorliegenden Ergebnisse nicht direkt mit der ersten Vorstudie vergleichen.

Die Rangfolgen bei der subjektiv erlebten Beanspruchung der beiden Voruntersuchungen bleiben jedoch für die Verfahren Pick-by-Projection und -Light unverändert.

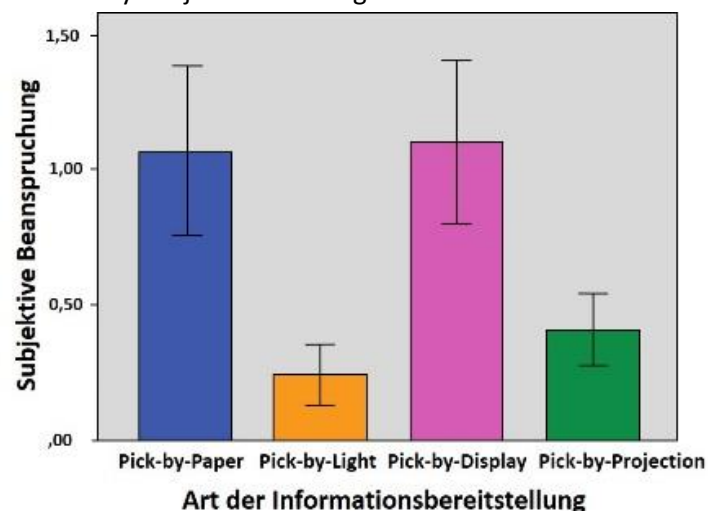


Abbildung 83: Balkendiagramm mit Standardabweichung für die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des modifizierten NASA-TLX der zweiten Vorstudie mit leistungsgeminderten Menschen (vgl. Baechler et al. 2016b)

Die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung dieser beiden Verfahren mit  $M = 0,28$  ( $SD = 0,28$ ) für Pick-by-Projection und  $M = 0,27$  ( $SD = 0,32$ ) für Pick-by-Light weichen kaum voneinander ab.

Der Abstand zu den beiden anderen Kommissionierverfahren mit  $M = 1,06$  (Pick-by-Paper) und  $M = 1,1$  (Pick-by-Display) ist über viermal höher und verdeutlicht – wie bereits die Ergebnisse der beiden anderen abhängigen Variablen – die Schwierigkeiten beim Einsatz dieser Verfahren für die Gruppe der leistungsgeminderten Menschen. Trotzdem spiegeln die absoluten Werte (bei einer Bewertungsskala von null bis drei) nicht das Maß der durch die Versuchsbetreuer wahrgenommenen Problematik wider. Dies könnte unter anderem an dem bereits 1939 von Roethlisberger und Dickson beschriebenen Phänomen des Hawthorne-Effekts liegen: Das Bewusstsein, an einer Untersuchung teilzunehmen, hat einen Einfluss auf das Reaktionsverhalten der Versuchsteilnehmenden (vgl. Roethlisberger und Dickson 1975). Dieser Effekt kann zusammen mit einem Bemühen, dem Interviewer zu gefallen (vgl. Bortz und Döring 2009), bzw. dem Phänomen der sozialen Erwünschtheit (siehe Kap. 8.1.5) dazu führen, dass die Ergebnisse gerade in Bezug auf die subjektive Beanspruchung durch die vier Kommissionierverfahren deutlich positiver ausfallen, als dies tatsächlich während der Versuchsdurchführung der Fall war. Eine Testung mit dem Friedman-Test ergibt mit  $\chi^2(3) = 10,26$ ,  $p = 0,016$  einen signifikanten Unterschied für die vier Kommissionierverfahren.

### ***Sonstige Beobachtungen***

Während der Kommissioniertätigkeiten der leistungsgeminderten Versuchsteilnehmer waren immer wieder deutliche Schwierigkeiten zu erkennen. Insbesondere die beiden Verfahren Pick-by-Paper und -Display waren meist nur mit intensiver Unterstützung durch die Versuchsbetreuer zu bewältigen.

In nahezu allen Fällen wurde die Systematik der Regalbeschriftung von den Versuchsteilnehmern nicht verstanden. Auch die Interpretation der tabellarisch aufgeführten Informationen bei Pick-by-Paper war für die Mehrheit der Versuchsteilnehmer nicht möglich. Zudem wurde wie bereits bei der vorhergehenden Untersuchung bei den drei gängigen Verfahren häufig der Wiegeprozess vergessen und die Einzelteil- mit der Gesamtbehälterentnahme verwechselt.

Bei fast allen Versuchsteilnehmern war während der Versuchsdurchführung eine sehr konzentrierte Arbeitsweise mit einem besonderen Bemühen, fehlerfrei zu arbeiten, erkennbar. Die Versuchsteilnehmer waren zwar wahrnehmbar langsamer als die normal leistungsfähigen Versuchsteilnehmer, jedoch deutlich bemüht, die erhaltenen Anweisungen richtig und gewissenhaft umzusetzen.

### **9.2.3 Ableitung von Gestaltungs- und Optimierungspotenzialen**

Die beschriebenen Ergebnisse und Beobachtungen der beiden Voruntersuchungen führen zu folgenden konstruktiven sowie system- und versuchsseitigen Anpassungen:

- Anbringen eines zusätzlichen Griffs am Rahmen der verschiebbaren Assistenzeinheit, um das Verschieben zu erleichtern.
- Umgestaltung der Befestigung der Waage als schwenkbare Einheit.
- Zur Anleitung des Verschiebeprozesses bzw. der Verschieberichtung werden die bisher auf dem Touchscreen dargestellten Pfeile durch Pfeilelemente, die auf die Projektionswinkel projiziert werden, ersetzt.
- Umsetzung des Prinzips „weniger ist mehr“ bei Pick-by-Projection:
  - *Reduzierung der Informationskanäle bzw. Konzentration auf Projektion.*

Der Touchscreen mit den angezeigten Videos und Fotografien (siehe Abbildung 84, links) wird zukünftig nicht mehr als Leitungs- und Darstellungsmedium genutzt und vom beweglichen Rahmenaufbau entfernt. Aufgrunddessen erfolgt die weitere Versuchsdurchführung allein mit dem regal- und dem wagenseitigen Projektor.



- Vereinfachung von Pick-by-Projection auf ein Anleitungslevel wie bei Pick-by-Light.  
Dies bedeutet eine starke Vereinfachung der visuellen Informationselemente: Anzeige eines grünen Balkens ohne weitere Informationen für die Anleitung der Gesamtbehälterentnahme; Anzeige eines grünen Balkens, eines Anleitungsfotos und einer arabischen Ziffer für die Anleitung der Einzelteilentnahme. Die bisher eingesetzten Piktogramme und Abbildungen der zu entnehmenden Artikel (siehe Abbildung 84, rechts) sowie die Anzeige von Zahlen bei der Gesamtbehälterentnahme entfallen.
- Die Versuchsteilnehmer werden bei Einweisung explizit auf das Mitschieben des Kommissionierwagens an den jeweils nachfolgenden Entnahmeort hingewiesen, um einheitliche Versuchsbedingungen für alle vier Verfahren sicherzustellen.
- Bei Auslassen des Wiegeprozesses wird wie bisher ein Fehler erfasst, zusätzlich wird nun der Versuchsteilnehmer auf das Durchführen des Wiegeprozesses hingewiesen.
- Bei der fehlerhaften Ausführung der Gesamtbehälter- statt Einzelteilentnahme wird ebenfalls nicht mehr nur ein Fehler erfasst, sondern der Versuchsteilnehmer zusätzlich darauf hingewiesen, dass im vorliegenden Fall die Artikel einzeln kommissioniert werden müssen.
- Bei der Fehlererfassung erfolgt zukünftig eine Kategorisierung der aufgetretenen Fehler, um eine detailliertere Auswertung zu ermöglichen.



Abbildung 84: Die Ausführung des Pick-by-Projection-Systems mit einer Videoanleitung auf dem Touchscreen (links) und die Ausführung des Pick-by-Projection-Systems in der zweiten Vorstudie mit projizierter Anleitung (rechts)

Zusätzlich wurde auf Vorschlag von zwei Versuchsteilnehmern und nach technischer Recherche innerhalb der Fachliteratur entschieden, bei der abschließenden Evaluierung das Verfahren Pick-by-Voice einzusetzen. Da jedoch der Einsatz von fünf Kommissionierverfahren den Versuchsaufwand deutlich erhöht und die Vergleichbarkeit erschweren würde, wurde entschieden, das Verfahren Pick-by-Display durch Pick-by-Voice zu ersetzen. Denn Pick-by-Display ist in seiner Ausführungsform sehr ähnlich zu Pick-by-Paper und hat auch in den bisherigen Vorstudien insgesamt eher unterdurchschnittlich abgeschnitten.

### 9.3 Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

Die folgende Studie fand als zweite Evaluierung mit leistungsgeminderten Menschen, ebenfalls in der Laborumgebung und erstmals mit einem unabhängig vom Bediener funktionierenden prototypischen Gesamtsystem (Hard- und Software), statt. Die Untersuchung erfolgte nach Einarbeitung der Optimierungspotenziale aus den zwei vorhergehenden Evaluierungen und nach Fertigstellung der Software durch das Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme der Universität Stuttgart im Juli 2015 über drei Tage, mit acht bzw. sieben leistungsgeminderten Versuchsteilnehmern pro Tag. Die Versuchsdurchführung ist bis auf wenige Abweichungen, wie z.B. das Ersetzen des Anleitungssystems Pick-by-Display durch -Voice und die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Optimierungen, identisch mit den bereits durchgeführten Vorstudien (siehe Kap. 9.2.1 und Kap. 9.2.2).

#### 9.3.1 Versuchsteilnehmer

An der Untersuchung haben aufgrund eines krankheitsbedingten Ausfalls 23 (6 Frauen und 17 Männer), statt der geplanten 24 Personen teilgenommen. Zusätzlich musste bei zwei Teilnehmern die Versuchsdurchführung abgebrochen werden, da sie nicht in der Lage waren, die gegebenen Anweisungen zu verstehen und auszuführen. Auch nach mehrmaligem Erklären und Vormachen war es diesen beiden Versuchsteilnehmern nicht möglich, den Kommissionierprozess mit einem der vier Anleitungssysteme eigenständig durchzuführen.

Die Auswahl der Versuchsteilnehmer erfolgte per Zufallsprinzip aus der Gesamtmitarbeiterschaft der Menschen mit geistiger Behinderung und mittlerem Leistungsgrad (siehe Kap. 4.2.2) der WfbM. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die ausgewählten Versuchsteilnehmer als Stichprobe bestmöglich die Verhältnisse der Grundgesamtheit widerspiegeln und Repräsentativität gewährleisten. Die Teilnahme an der Untersuchung war freiwillig. Eine Annahmequote der ausgewählten Mitarbeiter zur Teilnahme an der Untersuchung von 100 % spiegelt die hohe Bereitschaft und das Interesse der Teilnehmer wider. Die Zeitdauer für die Teilnahme betrug pro Versuchsteilnehmer durchschnittlich 60 Minuten.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Untersuchungsstichprobe

	♂ Männlich	♀ Weiblich	Σ Gesamt
<b>Anzahl</b>	17	6	23
<b>Alter in Jahren</b>	M= 34,9 (SD= 13,1), Min= 18, Max= 54	M= 45,5 (SD= 9,5), Min= 32, Max= 55	M= 37,7 (SD= 12,9), Min= 18, Max= 55
<b>Körpergröße in cm</b>	M= 171 (SD= 9), Min= 151, Max= 191	M= 159 (SD= 12), Min= 145, Max= 180	M= 168 (SD= 11), Min= 145, Max= 191
<b>Sehschwäche:</b>			
<b>Ja</b>	9 (52,9 %)	4 (66,7 %)	13 (56,5 %)
<b>Nein</b>	8 (47,1 %)	2 (33,3 %)	10 (43,5 %)
<b>Behinderungsart:</b>			
<b>Geistig</b>	15 (88,2 %)	6 (100 %)	21 (91,3 %)
<b>Psychisch</b>	2 (11,8 %)	0 (0 %)	2 (8,7 %)
<b>Aktuelle Tätigkeit:</b>			
<b>Montage</b>	13 (76,5 %)	5 (83,3 %)	18 (78,3 %)
<b>Sonstige</b>	4 (23,5 %)	1 (16,7 %)	5 (21,7 %)
<b>Kommissioniererfahrung:</b>			
<b>Ja</b>	2 (11,8 %)	0 (0 %)	2 (8,7 %)
<b>Nein</b>	15 (88,2 %)	6 (100 %)	21 (91,3 %)

Das Durchschnittsalter der 23 Versuchsteilnehmer lag bei 37,7 Jahren und die durchschnittliche Größe bei 1,68 m. Eine Sehschwäche hatten 13 Personen, davon gaben zwölf Personen an, dass sie eine Brille, und eine Person Kontaktlinsen als Sehhilfe benutzen. Entgegen der Vorgabe, dass für diese Studie nur Versuchsteilnehmer mit einer geistigen Behinderung ausgewählt werden sollten, hatten zwei der 23

Teilnehmer eine psychische Behinderung. Da diese beiden Teilnehmer denselben Leistungsgrad aufweisen und in ihren Verhaltensweisen den anderen Teilnehmern ähnlich waren, werden sie in den nachfolgenden Auswertungen nicht getrennt, sondern zusammen mit den Versuchsteilnehmern mit geistiger Behinderung betrachtet. Als aktuelle Tätigkeit haben 18 Versuchsteilnehmer Montageaufgaben, zwei Versuchsteilnehmer Logistikaufgaben und sechs Versuchsteilnehmer sonstige Tätigkeiten wie z.B. die Bedienung einer Presse oder Aufgaben in der Zerspanung angegeben. Nur zwei der 23 Versuchsteilnehmer hatten zum Untersuchungszeitpunkt Erfahrung in der Kommissionierung, womit nahezu alle Teilnehmer Anfänger in der Nutzung der vier Kommissionierverfahren waren. In Tabelle 15 ist die Zusammensetzung der Untersuchungsstichprobe der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen dargestellt.

### 9.3.2 Ergebnisdarstellung

Die Kommissionierung mit den beiden Anleitungssystemen Pick-by-Paper und -Voice ist vom Verständnis und der Arbeitsbeanspruchung für die vorliegende Zielgruppe als problematisch anzusehen. Während der Kommissionierung mit diesen beiden Anleitungssystemen konnte bei den Versuchsteilnehmern eine wahrnehmbare Zunahme des Stresslevels beobachtet werden. Dieser Anstieg der Beanspruchung äußerte sich vor allem durch eine verstärkte Unsicherheit und Nervosität, durch auftretende Hektik, durch ein vermehrtes Nachfragen der Versuchsteilnehmer nach Unterstützung und in zwei Fällen sogar durch einen selbstbestimmten Abbruch der Versuchsdurchführung der Teilnehmer.

Eine erste Zwischenauswertung der Kommissionierzeiten, -fehler und Beanspruchung nach sechs Versuchsdurchläufen bestätigte diese subjektive Wahrnehmung der Studienleitung und -mitarbeiter. Aus diesen Gründen wurde nach dem sechsten Versuchsteilnehmer gemeinsam mit dem pädagogischen und psychologischen Betreuungspersonal entschieden, diese beiden Anleitungssysteme aus Rücksicht auf die Versuchsteilnehmer ab sofort wegzulassen und für die weiteren Versuchsdurchläufe nur noch die Anleitungssysteme Pick-by-Light und -Projection zu evaluieren. Aus diesen Gründen finden die nachfolgenden Auswertungen der Kommissionierzeit, -fehlerrate und subjektiven Beanspruchung auf zwei verschiedene Arten statt: Zum einen als Vergleich aller vier Anleitungssysteme für  $N=6$  Versuchsteilnehmer und als Vergleich von Pick-by-Light und -Projection für  $N=21$  Versuchsteilnehmer (aufgrund des Abbruchs der Versuchsdurchführung von zwei Teilnehmern).

Des Weiteren wird auf die Befragung zu Pick-by-Projection, die Priorisierung der Systeme (Messung der Zufriedenheit) und sonstige Beobachtungen eingegangen.

#### **Kommissionierzeit**

Die deskriptive Auswertung der Kommissionierzeiten für die ersten sechs Versuchsteilnehmer und alle vier Arten der Informationsbereitstellung zeigt deutliche Schwankungen für die arithmetischen Mittelwerte und Mediane der einzelnen Informationstechniken (siehe Abbildung 85 links und Anhang S. 183).

Der mit Abstand höchste Mittelwert der Kommissionierzeiten ergibt sich mit 935 Sekunden ( $SD=626$  Sekunden) für die Kommissionierung via Papierliste, gefolgt von einer Anleitung per Sprachsteuerung mit Pick-by-Voice ( $M=771$  Sekunden,  $SD=417$  Sekunden). Die beiden niedrigsten mittleren Kommissionierzeiten werden mit Pick-by-Light ( $M=442$  Sekunden,  $SD=140$  Sekunden) und Pick-by-Projection ( $M=386$  Sekunden,  $SD=102$  Sekunden) erreicht. Die insgesamt schnellste Zeit für einen Kommissioniervorgang betrug 251 Sekunden und wurde mit einer Anleitung via Pick-by-Projection

erreicht. Die langsamste Kommissionierzeit mit 1980 Sekunden hingegen wurde bei einem Versuchsdurchlauf mit der Papierliste gemessen.

Die Informationstechniken Pick-by-Voice und -Paper weisen sowohl eine hohe Spannweite<sup>44</sup> ( $R= 1052$  Sekunden und  $R= 1485$  Sekunden), als auch eine hohe Standardabweichung ( $SD= 417$  Sekunden und  $SD= 626$  Sekunden) auf. Zudem ist anhand des großen Abstands zwischen dem unteren und oberen Quartil mit  $IQA= 621$  Sekunden für Pick-by-Voice und  $IQA= 930$  Sekunden für Pick-by-Paper erkennbar, dass die Kommissionierzeiten dieser beiden Techniken große Streuungen aufweisen (siehe Abbildung 85, links). Der geringe Interquartilsabstand von Pick-by-Light und -Projection hingegen lässt auf nah beieinanderliegende Kommissionierzeiten schließen. Zudem weisen diese beiden Kommissionierverfahren sowohl eine verhältnismäßig geringe Standardabweichung ( $SD= 140$  Sekunden und  $SD= 102$  Sekunden) als auch eine geringe Spannweite ( $R= 398$  Sekunden und  $R= 304$  Sekunden) auf. Auch die Mediane der beiden Systeme bestätigen, bei einem geringen Vorsprung der Projektions-Variante, dass hier zügiges Arbeiten möglich war ( $\bar{x}_{med}= 444$  Sekunden und  $\bar{x}_{med}= 386$  Sekunden). Die Mediane der beiden anderen Informationstechniken Pick-by-Paper und -Voice hingegen liegen in einem wesentlich höheren Bereich ( $\bar{x}_{med}= 592$  Sekunden und  $\bar{x}_{med}= 645$  Sekunden). Weiterhin ist für diese beiden Kommissionierverfahren (Pick-by-Paper und -Voice) anhand des Box-Whisker-Plots und der Differenz zwischen den arithmetischen Mitteln und den Medianen eine deutlich rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung der Kommissionierzeiten erkennbar, d.h. es kommt in Einzelfällen zu erheblich längeren Zeiten.

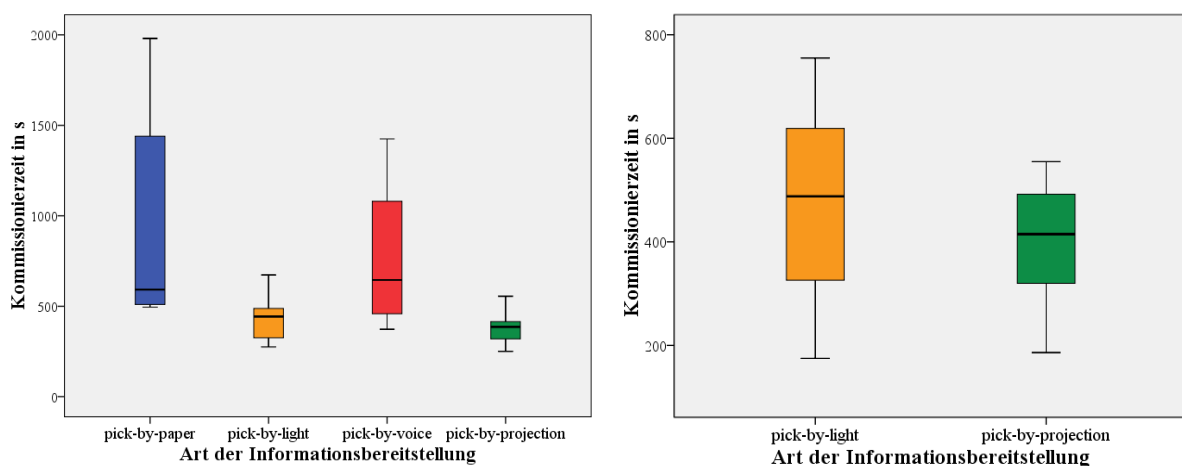


Abbildung 85: Box-Whisker-Plot der Kommissionierzeiten für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei  $N= 6$  Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei  $N= 21$  Versuchsteilnehmern (rechts)

Die weitere deskriptive Auswertung der Kommissionierzeiten von Pick-by-Light und -Projection für alle 21 Versuchsteilnehmer zeigt einen leichten Anstieg für die arithmetischen Mittelwerte ( $M= 484$  Sekunden,  $SD= 171$  Sekunden und  $M= 398$  Sekunden,  $SD= 121$  Sekunden) und Mediane dieser beiden Informationstechniken (siehe Abbildung 85 rechts und Anhang S. 183). Die größere Anzahl an Versuchsteilnehmern führt zudem erwartungsgemäß zu einer stärkeren Streuung der einzelnen Kommissionierzeiten. So liegt bei 21 Versuchsteilnehmern die Spannweite bei  $R= 580$  Sekunden für Pick-by-Light und bei  $R= 369$  Sekunden für Pick-by-Projection.

<sup>44</sup> Die Spannweite stellt das einfachste Streumaß der deskriptiven Statistik dar. Dieses Maß berechnet sich über die Differenz bzw. den Abstand zwischen dem maximalen und dem minimalen Messwert einer Stichprobe (vgl. Sachs 2004).

Die Werte für das erste Quartil bleiben bei 21 Versuchsteilnehmern sowohl für Pick-by-Light als auch für -Projection gleich hoch ( $x_{Q1} = 326$  Sekunden bzw.  $x_{Q1} = 320$  Sekunden). Die Werte für das dritte Quartil hingegen steigen für Pick-by-Light von  $x_{Q3} = 488$  Sekunden (bei sechs Versuchsteilnehmern) auf  $x_{Q3} = 619$  Sekunden (bei 21 Versuchsteilnehmern) und für Pick-by-Projection von  $x_{Q3} = 415$  Sekunden auf  $x_{Q3} = 492$  Sekunden. Die kürzeste, aber auch die längste Zeit für einen Kommissioniervorgang wird mit 175 Sekunden bzw. 755 Sekunden bei einer Anleitung mit Pick-by-Light gemessen.

Zur Überprüfung der Verteilung der einzelnen abhängigen Stichproben wird der Kolmogorov-Smirnov-Test mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors (für  $p < 0,05$ ) eingesetzt. Dieser ergibt, dass die Variablen Pick-by-Light, -Voice und -Projection bei den ersten sechs Versuchsteilnehmern normalverteilt sind. Einzig für Pick-by-Paper,  $D(6) = 0,363$ ,  $p = 0,013$  ergibt sich ein signifikantes Ergebnis, was bedeutet, dass für diese Variable keine Normalverteilung sichergestellt werden kann. Eine Überprüfung der beiden Variablen Pick-by-Light und -Projection mit  $N = 21$  Versuchsteilnehmern ergibt nur für Pick-by-Light eine Normalverteilung. Für Pick-by-Projection hingegen kann keine Normalverteilung sichergestellt werden,  $D(21) = 0,222$ ,  $p = 0,008$ . Aus diesem Grund werden für die weitere Auswertung beider Datensätze ( $N = 6$  und  $N = 21$  Versuchsteilnehmer) verteilungsfreie Verfahren eingesetzt. Eine grafische Prüfung auf Ausreißer oder Extremwerte mit Hilfe des Box-Whisker-Diagramms ergibt keine Auffälligkeiten. Deshalb erfolgt im nächsten Schritt die Überprüfung der Rangmittel bei sechs Versuchsteilnehmern mit Hilfe des Friedman-Tests und bei  $N = 21$  Versuchsteilnehmern mit Hilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests.

Der Friedman-Test ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied für die Mittelwerte der Kommissionierzeiten der vier verschiedenen Arten der Informationsbereitstellung,  $\chi^2(3) = 15,4$ ,  $p = 0,002$ . Mit diesem Ergebnis ist jedoch nicht bekannt, zwischen welchen Arten der Informationsbereitstellung die Signifikanz besteht. Um das zu klären, werden nun die vier Verfahren in einer Post-Hoc-Analyse mit dem Wilcoxon-Test und einer Bonferroni-Korrektur paarweise auf Signifikanz untersucht (vgl. Roach 2014). Dabei ist trotz teilweise deutlichen Varianzen bei den mittleren Kommissionierzeiten für keines der Paare<sup>45</sup> ein signifikanter Unterschied festzustellen. Bei 21 Versuchsteilnehmern hingegen zeigt der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben, dass die mittlere Kommissionierzeit bei einer Informationsbereitstellung mittels Pick-by-Projection signifikant kürzer wird als bei der Informationsbereitstellung mittels Pick-by-Light ( $Z = -3,563$ ,  $p < 0,001$ , für  $p < 0,05$ ).

Auf Basis des Friedman-Tests für  $N = 6$  und des Wilcoxon-Tests für  $N = 21$  Versuchsteilnehmer kann die Nullhypothese

*$H_{0,z}$ : Die Kommissionierzeit ist bei allen vier Kommissionierverfahren unabhängig von der Informationsbereitstellung. Somit besteht bezogen auf die Kommissionierzeit kein Unterschied zwischen den Kommissionierverfahren.*

verworfen und stattdessen die Alternativhypothese

*$H_{1,z}$ : Die Kommissionierzeit ist abhängig von der Art der Informationsbereitstellung.*

angenommen werden.

<sup>45</sup> Pick-by-Paper und -Light ( $Z = -2,201$ ,  $p = 0,028$ ), Pick-by-Paper und -Voice ( $Z = -1,363$ ,  $p = 0,173$ ), Pick-by-Paper und -Projection ( $Z = -2,201$ ,  $p = 0,028$ ), Pick-by-Voice und -Light ( $Z = -2,201$ ,  $p = 0,028$ ), Pick-by-Voice und -Projection ( $Z = -2,201$ ,  $p = 0,028$ ) sowie Pick-by-Projection und -Light ( $Z = -1,577$ ,  $p = 0,115$ ) für ein Signifikanzniveau von  $p < 0,017$ .

### Kommissionierfehlerrate

Im Zuge der deskriptiven Auswertung der Kommissionierfehlerrate zeigen sich (wie bereits bei den Kommissionierzeiten) erhebliche Schwankungen für die Mittelwerte und Mediane der einzelnen Kommissionierverfahren.

Für  $N=6$  Versuchsteilnehmer ergibt sich bei Pick-by-Paper das höchste arithmetische Mittel (über die Fehlerraten aller Versuchsteilnehmer) von  $M=60\%$ , mit durchschnittlich 16,83 Fehlern und einer Standardabweichung von  $SD=74\%$ . Die Mittelwerte der Fehlerraten von Pick-by-Light mit  $M=35\%$  ( $SD=49\%$ ,  $M=9,67$  Fehler) und Pick-by-Voice mit  $M=33\%$  ( $SD=48\%$ ,  $M=9,33$  Fehler) hingegen liegen ungefähr halb so hoch wie bei Pick-by-Paper. Das Kommissionierverfahren Pick-by-Projection weist mit  $M=3\%$  ( $SD=7\%$ ,  $M=0,83$  Fehler) eine weitere deutliche Reduzierung und folglich die mit Abstand niedrigste mittlere Kommissionierfehlerrate auf (siehe Anhang S. 184). Somit findet bei der Kommissionierung mit dem Assistenzsystem gegenüber der Kommissionierung mit der Papierliste eine Reduktion der Fehlerrate auf ein Zwanzigstel statt.

Die Boxplots der vier Informationstechniken (siehe Abbildung 86 links) zeigen zudem starke Streuungen für die Kommissionierfehlerraten von Pick-by-Paper ( $R=189\%$ ) und -Voice ( $R=114\%$ ). Des Weiteren lassen die deutlich geringeren Werte der Mediane gegenüber den arithmetischen Mitteln darauf schließen, dass für alle vier Informationstechniken, bis auf Pick-by-Projection, eine deutlich rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung vorliegt. Darüber hinaus sind im Boxplot für sechs Versuchsteilnehmer bei den Kommissionierverfahren Pick-by-Light und -Projection für „Versuchsteilnehmer 1“ zwei Extremwerte zu erkennen.

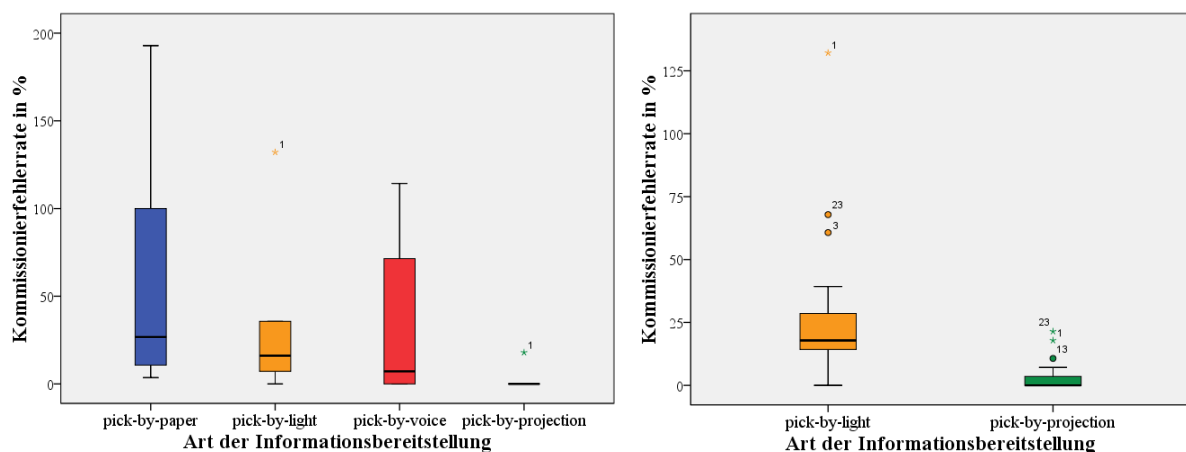


Abbildung 86: Box-Whisker-Plot der Kommissionierfehlerrate für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei  $N=6$  Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei  $N=21$  Versuchsteilnehmern (rechts)

In der weiteren deskriptiven Auswertung der Kommissionierfehlerrate von Pick-by-Light und -Projection mit 21 Versuchsteilnehmern (siehe Abbildung 86 rechts) wird ersichtlich, dass der arithmetische Mittelwert (bei der deutlich höheren Anzahl an Versuchsteilnehmern) geringfügig auf  $M=27\%$  ( $SD=30\%$ ) sinkt bzw. mit  $M=3\%$  ( $SD=6\%$ ) gleich bleibt (siehe Anhang S. 184). Die höhere Zahl der Versuchsteilnehmer führt zudem zu einer spitzgipfeligen Verteilung bzw. zu einer Verdichtung der Fehlerraten bei Pick-by-Light. Dies wird an dem kleineren bzw. gesunkenen Interquartilsabstand von  $IQA=29\%$  (bei  $N=6$ ) auf  $IQA=15\%$  (bei  $N=21$ ) ersichtlich. Bei Pick-by-Projection hingegen findet von  $IQA=0\%$  (bei  $N=6$ ) auf  $IQA=4\%$  (bei  $N=21$ ) eine Aufweitung des Interquartilsabstands statt. Das bedeutet, dass sich die Verteilung der Fehlerraten durch die höhere Anzahl an Versuchsteilnehmern verbreitert hat. Die Spannweiten der beiden Informationstechniken bleiben mit  $R=130\%$  und  $R=21\%$  (bei  $N=21$ ) hingegen nahezu konstant gegenüber der Versuchsdurchführung mit  $N=6$  Versuchsteilnehmern. Die grafische Darstellung der Boxplots und die Unterschiede zwischen den

Medianen und den arithmetischen Mitteln zeigen wiederum eine rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung der vorliegenden Daten. Zudem ist im Boxplot die gestiegene Anzahl an Ausreißern (Versuchsteilnehmer Nr. 3 und Nr. 23 bei Pick-by-Light und Versuchsteilnehmer Nr. 13 bei Pick-by-Projection) und Extremwerten (Versuchsteilnehmer Nr. 1 bei Pick-by-Light und Versuchsteilnehmer Nr. 1 und Nr. 23 bei Pick-by-Projection) erkennbar.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors (für  $p < 0,05$ ) führt wie erwartet (siehe Kap. 9.1) zu dem Ergebnis, dass für  $N = 6$  nur bei Pick-by-Paper,  $D(6) = 0,315$ ,  $p = 0,064$  und bei Pick-by-Voice,  $D(6) = 0,320$ ,  $p = 0,055$  eine Normalverteilung für die Fehlerrate vorliegt. Eine weitere Prüfung der beiden nicht normalverteilten Verfahren auf eine für Fehler übliche Poisson-Verteilung ergibt jedoch nur für Pick-by-Light eine Übereinstimmung.

Für  $N = 21$  Versuchsteilnehmer kann mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test weder für Pick-by-Light noch für -Projection eine Normalverteilung nachgewiesen werden. Aus diesen Gründen erfolgen die Tests auf Unterschiede der Mittelwerte sowohl bei  $N = 6$ , als auch bei  $N = 21$  Versuchsteilnehmern mit verteilungsfreien Verfahren.

Eine Überprüfung der Ausreißer und Extremwerte führt zu einem Ausschluss der Versuchsteilnehmer Nr. 1 und Nr. 23<sup>46</sup> aus den weiteren Berechnungen. Bei näherer Betrachtung der Resultate dieser beiden Personen konnte festgestellt werden, dass offenbar aufgrund ihrer überdurchschnittlich starken kognitiven Beeinträchtigung die verwendeten Kommissionierverfahren keine adäquate Unterstützung bieten können. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse für die vorliegende Zielgruppe bzw. Evaluierung nicht repräsentativ und werden von den nachfolgenden Analysen ausgeschlossen.

Die weitere Prüfung der Nullhypothese erfolgt für  $N = 5$  Personen mit dem Friedman-Test. Dieser liefert einen statistisch signifikanten Unterschied für die Mittelwerte der Kommissionierfehlerrate der vier verschiedenen Verfahren mit  $\chi^2(1) = 4,00$ ,  $p = 0,046$ .

Für die Signifikanzprüfung der Verfahren Pick-by-Light und -Projection mit  $N = 19$  wird erneut der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben eingesetzt. Dieser weist mit  $Z = -3,530$ ,  $p = 0,000$ , für  $p < 0,05$  ebenfalls einen signifikanten Unterschied für den Mittelwert der Kommissionierfehlerrate mit dem Verfahren Pick-by-Projection gegenüber dem Mittelwert mit Pick-by-Light nach.

Anhand der Ergebnisse des Friedman-Tests für  $N = 5$  und des Wilcoxon-Tests für  $N = 19$  kann die Nullhypothese

*H<sub>0,F</sub>: Die Kommissionierfehlerrate ist bei allen vier Kommissionierverfahren unabhängig von der Informationsbereitstellung. Somit besteht bezogen auf die Fehlerrate kein Unterschied zwischen den Kommissionierverfahren.*

verworfen und die Alternativhypothese

*H<sub>1,F</sub>: Die Kommissionierfehlerrate ist abhängig von der Art der Informationsbereitstellung.*

angenommen werden.

---

<sup>46</sup> Der Ausschluss von Versuchsteilnehmer Nr. 23 betrifft nur den Vergleich von Pick-by-Light und -Projection mit  $N = 21$  Versuchsteilnehmern.



### **Subjektive Beanspruchung**

Die Bewertung der subjektiven Beanspruchung erfolgte mit Hilfe des modifizierten NASA-TLX (siehe Kap. 8.1.6). Die nachfolgende Fragebogenauswertung zeigt, ob die Versuchsteilnehmer bei der Nutzung der verschiedenen Kommissionierverfahren Unterschiede bzgl. der mentalen Beanspruchung erlebt haben.

Zur deskriptiven Auswertung wird für jeden Versuchsteilnehmer und jedes Anleitungssystem der Mittelwert aus den sechs Skalen gebildet. Dabei wurden die einzelnen Skalen von den Versuchsteilnehmern anhand von vier Antwortmöglichkeiten, jeweils mit einer Punktzahl von 0 bis 3 (lachender Smiley= 0, lächelnder Smiley= 1, missmutiger Smiley= 2, trauriger Smiley= 3) bewertet (siehe Kap. 8.1.6). Der Mittelwert aus diesen sechs Einzelwerten – bezogen auf den jeweiligen Versuchsteilnehmer und das evaluierte Kommissionierverfahren – ergibt den errechneten Wert für die subjektiv erlebte Arbeitsbeanspruchung.

Für  $N= 6$  Versuchsteilnehmer variieren die arithmetischen Mittelwerte der sechs subsummierten Skalen zwischen  $M= 0,25$  ( $SD= 0,23$ ) bei Pick-by-Projection,  $M= 0,44$  ( $SD= 0,34$ ) bei Pick-by-Light,  $M= 1,47$  ( $SD= 0,25$ ) bei Pick-by-Voice sowie  $M= 2,28$  ( $SD= 0,34$ ) bei Pick-by-Paper. Zwischen der geringsten Beanspruchung bei Pick-by-Projection und der höchsten Beanspruchung bei Pick-by-Paper liegt somit mindestens der Faktor 9. Diese starken Schwankungen der subjektiv erlebten Arbeitsbeanspruchung zwischen den einzelnen Kommissionierverfahren (bei  $N= 6$ ) zeigen sich nicht nur anhand der Mittelwertvarianz, sondern werden auch in der grafischen Darstellung im Boxplot (siehe Abbildung 87 links) und bei Betrachtung der weiteren Lagemaße (siehe Anhang S. 185) ersichtlich. Die Schwankungen innerhalb der einzelnen Kommissionierverfahren sind geringer als bei den bisherigen Ergebnissen der Kommissionierzeiten und -fehlerraten.

Die weitere deskriptive Auswertung von Pick-by-Light und -Projection ergibt mit der vergrößerten Anzahl an Versuchsteilnehmern von  $N= 21$  für beide Kommissionierverfahren eine Erhöhung des arithmetischen Mittelwertes auf  $M= 0,53$  (mit  $SD= 0,36$ ) bei Pick-by-Light bzw. auf  $M= 0,38$  (mit  $SD= 0,25$ ) bei Pick-by-Projection. Des Weiteren führt die gestiegene Anzahl an Versuchsteilnehmern zu einer Verdichtung der subjektiven Beanspruchungswerte bei Pick-by-Projection. Dies wird am geringeren Interquartilsabstand von  $IQA= 0,33$  (bei  $N= 21$ ) im Gegensatz zu  $IQA= 0,50$  (bei  $N= 6$ ) deutlich. Bei Pick-by-Light hingegen ist mit  $IQA= 0,67$  (bei  $N= 6$ ) und  $IQA= 0,66$  (bei  $N= 21$ ) nur eine geringe Veränderung des Interquartilsabstands erkennbar. Der Streubereich der einzelnen Daten nimmt hingegen selbst bei der vergrößerten Anzahl an Versuchsteilnehmern mit den Spannweiten  $R= 0,84$  (bei  $N= 6$ ) und  $R= 1,0$  (bei  $N= 21$ ) für Pick-by-Light und  $R= 0,50$  ( $N= 6$ ) und  $R= 0,83$  (bei  $N= 21$ ) für Pick-by-Projection nur geringfügig zu. Zudem ist anhand der grafischen Darstellung des Boxplots und des Unterschiedes zwischen dem Median und dem arithmetischen Mittel für das Verfahren Pick-by-Projection (bei  $N= 21$ ) eine rechtssteile bzw. linksschiefe Verteilung erkennbar (siehe Abbildung 87 rechts).

Die analytische Auswertung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors (für  $p < 0,05$ ) ergibt bei  $N= 6$  mit  $D(6)= 0,204$ ,  $p= 0,200$  für Pick-by-Paper,  $D(6)= 0,204$ ,  $p= 0,200$  für Pick-by-Light,  $D(6)= 0,214$ ,  $p= 0,200$  für Pick-by-Voice und  $D(6)= 0,195$ ,  $p= 0,200$  für Pick-by-Projection eine Normalverteilung für alle vier Stichproben. Bei  $N= 21$  hingegen kann mit  $D(21)= 0,180$ ,  $p= 0,074$  nur für Pick-by-Light eine Normalverteilung nachgewiesen werden. Aus diesen Gründen erfolgt die Testung auf Unterschiede der Mittelwerte bei  $N= 6$  mit parametrischen und bei  $N= 21$  mit verteilungsfreien Verfahren.

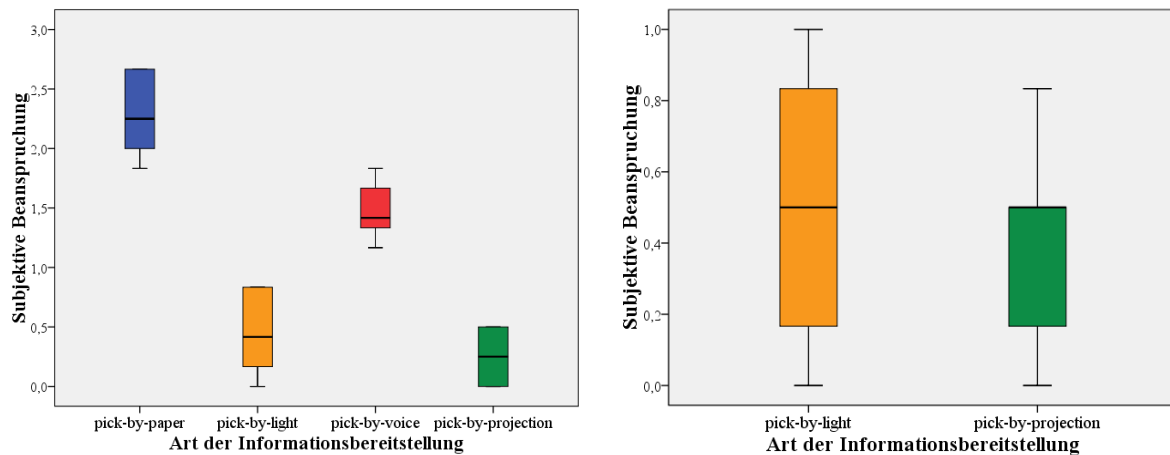


Abbildung 87: Box-Whisker-Plot der subjektiv erlebten Beanspruchung anhand des modifizierten NASA-TLX für alle vier Arten der Informationsbereitstellung bei  $N=6$  Versuchsteilnehmern (links) sowie von Pick-by-Light bzw. -Projection bei  $N=21$  Versuchsteilnehmern (rechts)

Die Prüfung der Nullhypothese für  $N=6$  Versuchsteilnehmer mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung ergibt für die Mittelwerte der subjektiv erlebten Beanspruchung bei den vier Kommissionierverfahren mit  $F(1, 5) = 155,34$ ,  $p < 0,01$  ein statistisch höchst signifikantes Ergebnis. Dieses Ergebnis zeigt allerdings nur, dass signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten vorliegen, und nicht, welcher Mittelwert signifikant von den anderen abweicht. Aus diesem Grund wird im Nachgang ein sogenannter Post-Hoc-Test gerechnet. Dies bedeutet, dass für alle möglichen Paarvergleiche (im vorliegenden Fall mit vier verschiedenen Kommissionierverfahren sind dies sechs Paarvergleiche) ein t-Test für abhängige Stichproben gerechnet wird. Dabei ergibt sich für alle t-Tests, bis auf den paarweisen Vergleich von Pick-by-Light und -Projection ( $t(5) = 1,234$ ,  $p = 0,272$ , für  $p < 0,008$ ), ein signifikantes Ergebnis.

Die Signifikanzprüfung der Verfahren Pick-by-Light und -Projection (bei  $N=21$ ) mit dem Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben konnte mit  $Z = -1,771$ ,  $p = 0,076$ , für  $p < 0,05$  keinen signifikanten Unterschied für die Mittelwerte der subjektiven Beanspruchung nachweisen.

Auf Basis der Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung für  $N=6$  kann die Nullhypothese

$H_{0,TLX}$ : Die subjektiv erlebte mentale Beanspruchung ist für alle vier Kommissionierverfahren gleich.

verworfen und die Alternativhypothese

$H_{1,TLX}$ : Bei Pick-by-Projection und -Light ist die subjektiv erlebte mentale Beanspruchung niedriger als bei Pick-by-Paper und -Voice.

angenommen werden.

### Befragung zu Pick-by-Projection

Der zweite Teil des persönlichen Fragebogens wurde nach dem Versuchsdurchlauf mit Pick-by-Projection ausgefüllt. Hierbei geben die Versuchsteilnehmer in der Bewertung von 14 Statements (siehe Anhang S. 174) ihre Einschätzung zu Systemaspekten von Pick-by-Projection ab, um eine weitere Einschätzung zur Gebrauchstauglichkeit zu gewinnen und Optimierungspotenziale des Systems aufzudecken.

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigen, dass die 23 Versuchsteilnehmer die Nutzung und den Umgang mit dem Assistenzsystem mehrheitlich als eine positive und auf ihre Bedürfnisse akzentuierte Form der Unterstützung bewerten. Dies zeigt sich vor allem durch die hohe Anzahl an Stimmen für die positivste Bewertung „Stimmt genau“ bei den Statements „Die Nutzung des Systems war nach kurzer Zeit verständlich“ (N= 16, 67 %), „Die Einblendung der Informationen direkt in den Arbeitsbereich hilft Fehler zu vermeiden“ (N= 13, 54 %), „Die Arbeit mit dem System war interessant“ (N= 18, 75 %) und „Die Arbeit mit dem Assistenzsystem hat mir Spaß gemacht“ (N= 16, 67 %).

Aus den Statements „Das Verschieben des Systems war sehr kraftaufwändig“ und „Die Arbeit mit dem Gerät erfordert Übung“ lassen sich angesichts des leicht negativen Bewertungstrends Optimierungspotenziale ableiten. Diese betreffen vor allem eine Verbesserung des Verschiebeprozess und eine längere Studiendauer.

Die Bewertungen der restlichen sieben Statements weisen positive bis neutrale Fragebogenergebnisse auf, weshalb aus ihnen keine Verbesserungs- oder Änderungsmaßnahmen für das Assistenzsystem abgeleitet werden.

### **Zufriedenheit**

Im Anschluss an die Befragung zu Pick-by-Projection wurde die Priorisierung der verschiedenen getesteten Systeme zur Messung der Zufriedenheit als Rangordnungsaufgabe (siehe Kap. 8.1.3 und Kap. 8.1.6) durchgeführt. Diese vergleichende Evaluation fand unterteilt in sechs Kategorien (siehe Anhang S. 174) und mit einer Bewertung bzw. Priorisierung der Systeme jeweils von 1 bis 4 (1= zufriedenstellendstes System, ..., 4= am wenigsten zufriedenstellendes System), statt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei N= 6 als auch bei N= 21 Versuchsteilnehmern Pick-by-Projection immer am besten und Pick-by-Paper immer am schlechtesten abschneidet. Bei Betrachtung der ersten fünf Kategorien in aufsummierter Form für N= 6 Versuchsteilnehmer variieren die arithmetischen Mittelwerte zwischen  $M= 1,07$  ( $SD= 0,10$ ) bei Pick-by-Projection,  $M= 2,10$  ( $SD= 0,28$ ) bei Pick-by-Light,  $M= 3,10$  ( $SD= 0,35$ ) bei Pick-by-Voice sowie  $M= 3,73$  ( $SD= 0,56$ ) bei Pick-by-Paper.

Für N= 21 Versuchsteilnehmer variieren die arithmetischen Mittelwerte zwischen  $M= 1,10$  ( $SD= 0,25$ ) bei Pick-by-Projection sowie  $M= 1,96$  ( $SD= 0,30$ ) bei Pick-by-Light.

Die letzte Frage zur Priorisierung der Systeme „Mit welchem System könnten Sie sich vorstellen auch über einen längeren Zeitraum zu arbeiten“ ergibt für N= 6 Versuchsteilnehmer die arithmetischen Mittelwerte  $M= 1,00$  ( $SD= 0,00$ ) bei Pick-by-Projection,  $M= 2,17$  ( $SD= 0,41$ ) bei Pick-by-Light,  $M= 3,17$  ( $SD= 0,41$ ) bei Pick-by-Voice sowie  $M= 3,67$  ( $SD= 0,82$ ) bei Pick-by-Paper.

Für N= 21 Versuchsteilnehmer variieren die arithmetischen Mittelwerte zwischen  $M= 1,10$  ( $SD= 0,30$ ) bei Pick-by-Projection und  $M= 1,95$  ( $SD= 0,38$ ) bei Pick-by-Light.

### **Sonstige Beobachtungen**

Bei der Kommissionierung mit dem Anleitungsverfahren Pick-by-Paper haben alle sechs Versuchsteilnehmer große Schwierigkeiten sowohl beim Auffinden und Interpretieren der erforderlichen Informationen auf der Papierliste und an den Lagerorten, als auch beim Verständnis der Chronologie der Lagerortkennzeichnung. Zudem stellt die Unterscheidung von Entnahme- und Ablageort sowie die Orientierung in Bezug auf die jeweils zu kommissionierende Auftragsposition innerhalb der tabellarischen Darstellung eine große Herausforderung für die Versuchsteilnehmer dar und verursacht einige Fehler durch das Verwechseln der Lagerkoordinaten sowie durch das Verrutschen zwischen den einzelnen Auftragspositionen.

Auch das Kommissionierverfahren Pick-by-Voice bereitet ähnliche Schwierigkeiten bei der Nutzung. Insbesondere die nicht kontinuierlich zur Verfügung stehenden Informationen und die daraus

resultierenden Anforderungen an die Gedächtnisleistung, um sich die drei Lagerkoordinaten zu merken, führten zu einer wahrnehmbaren Zunahme der Probleme bzgl. der Kommissionierausführung. Dies äußerte sich beispielsweise durch eine steigende Nervosität, Hektik und Unsicherheit mit zunehmenden Unterstützungsbedarf sowie häufigen Wiederholungen der Sprachanweisungen und langen Suchzeiten für das Lokalisieren der Entnahmeorte. Bei den Verfahren Pick-by-Paper und -Voice konnte die Mehrheit der Versuchsteilnehmer die Systematik der numerischen Regalbeschriftung, selbst nach mehrmaliger Erklärung, nicht verstehen.

Zudem stellt die akustische Informationsübermittlung für die Untersuchungsteilnehmer aufgrund der Schwierigkeit der isolierten bzw. gefilterten Wahrnehmung der erforderlichen Informationen aus den verschiedensten Sinneseindrücken eine erheblich größere Herausforderung als für normal leistungsfähige Personen dar. Zusätzlich erforderte die akustische Wahrnehmung der Informationen eine deutlich höhere Konzentration für das Verständnis der Wortbausteine der Sprachanweisungen als bei der visuellen Bereitstellung mittels Pick-by-Light und -Projection, was sich auch an der deutlich höheren Kommissionierzeit zeigt. Einige Teilnehmer beschwerten sich während der Versuchsdurchführung mit Pick-by-Voice über eine zu geringe Lautstärke der Sprachanweisung. Dies lag jedoch bei allen aufgetretenen Fällen nicht an der Lautstärke der Anweisungen, sondern am nicht funktionsgerechten Tragen des Headsets bzw. an einem Verrutschen des Lautsprechers aus dem Gehörgang während der Versuchsdurchführung.

Die Beobachtungen dieser Hauptstudie bestätigen die Ergebnisse der beiden Vorstudien in Bezug auf die einfache und schnelle Verständlichkeit des Kommissionierverfahrens Pick-by-Light. Trotzdem sind bei einigen Versuchsteilnehmern längere Suchzeiten für das Auffinden der jeweils nachfolgenden Kommissionierposition zu beobachten. In den meisten Fällen lässt sich dies jedoch zum einen auf die Kurzsichtigkeit einiger Versuchsteilnehmer und zum anderen auf die verhältnismäßig kleinen Durchmesser der LEDs und die daraus resultierende erschwerte Erkennbarkeit zurückführen. Zudem kommt es häufig zu Fehlern bei der Gesamtbehälterentnahme. Es ist also auch hier problematisch, dass die richtige Entnahmeeinheit nicht angezeigt wird. Die anfängliche Einweisung mit der Zuordnung der unterschiedlichen Regalebenen ist bei den meisten Versuchsteilnehmern während der Untersuchung in Vergessenheit geraten und die angezeigten Entnahmemengen der A- und B-Ebene werden von den Versuchsteilnehmern ebenfalls als Einzelteilentnahme interpretiert.

Die Reduzierung der Informationskanäle durch den Wegfall des Touchscreens als zusätzliches Anleitungsmedium und die Vereinfachung der projizierten Informationselemente bei Pick-by-Projection führt zu einer wahrnehmbaren Reduzierung der Nervosität, Hektik und kognitiven Anstrengung während der Versuchsdurchführung. Durch die projizierte Darstellung aller erforderlichen Informationen direkt in den Arbeitsbereich entsteht ein „ruhigerer“ Arbeitsfluss und die bisherigen „Unterbrechungen“ für das Lokalisieren und Aufsuchen der nachfolgenden Entnahmepositionen entfallen. Auch die Anzahl der Rückfragen an die Versuchsbetreuer fällt bei diesem Verfahren nicht nur im Gegensatz zu den vorhergehenden Studien, sondern auch im Verhältnis zu den anderen drei Kommissionierverfahren deutlich geringer aus. Die Mehrheit der Versuchsteilnehmer war bei dieser Anleitungsform bereits nach dem ersten Probelauf in der Lage, die Kommissionierung selbstständig durchzuführen.

### 9.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertungen der Studien zeigen stetige Verbesserungen von einer Evaluierung zur nächsten. Das liegt daran, dass die im Zuge der Vorstudien durchgeführten Usability-Tests, beginnend von der Versuchsvorbereitung über die Versuchsdurchführung bis hin zur anschließenden Versuchsauswertung, insbesondere die Verbesserung des Assistenzsystems (Pick-by-Projection) im Blick auf die Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz für leistungsgeminderte Menschen zum Ziel hatten. Vor allem bei der abschließenden Hauptstudie mit dem funktionsfähigen Assistenzsystem ist daher im Vergleich zu den bisherigen Studien eine deutliche Verbesserung der drei abhängigen Variablen Kommissionierzeit, -fehler und subjektive Beanspruchung bei der Pick-by-Projection-Kommissionierung zu beobachten.

Die Art der Sehhilfe, die Körpergröße, die aktuelle Tätigkeit, das Geschlecht sowie die Kommissioniererfahrung hatten keinen messbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Daher werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht näher diskutiert.

In den vorliegenden Evaluierungen stehen neben den objektiven Variablen vor allem die subjektiven Eindrücke und Meinungen der Nutzer und Versuchsbetreuer im Vordergrund. Nicht nur die individuellen Eigenschaften, sondern auch die tagesformabhängige Konstitution (persönliche Verfassung, Tageszeit etc.) spielen eine bedeutende Rolle. Diese personenbezogene Konstitution wirkt sich auf die Ergebnisse aller vier bzw. zwei Systemdurchgänge aus. Aufgrund der großen Varianz innerhalb der Personengruppe der leistungsgeminderten Menschen, aber auch aufgrund der insgesamt großen Variabilität des menschlichen Leistungsverhaltens sind sowohl unter den subjektiven als auch unter den objektiven Variablen Schwankungen erkennbar, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

#### **Kommissionierzeit**

Auf Basis der statistischen Berechnungen kann für die Kommissionierzeit die  $H_0$  verworfen und die  $H_1$  angenommen werden: Die Kommissionierzeit ist abhängig von der Informationsbereitstellungsart.

Zudem zeigen die Unterschiede der mittleren Kommissionierzeiten der verschiedenen Anleitungsverfahren sowohl bei den sechs, als auch bei den 21 Versuchsteilnehmern, dass mithilfe des neuentwickelten Assistenzsystems für manuelle Kommissioniertätigkeiten die Bearbeitungszeit der Aufträge signifikant sinkt.

Die geringen Kommissionierzeiten sowohl von Pick-by-Light als auch von Pick-by-Projection gegenüber den anderen beiden Verfahren lassen sich über den im Verhältnis geringen Informationsgehalt und die intuitive Informationsdarstellung der Verfahren erklären. So wird bei Pick-by-Light und -Projection durch ein Aufleuchten von Lichtelementen der Lagerort für die Versuchsteilnehmer direkt erkennbar. Mit Hilfe der umgesetzten Optimierungs- und Gestaltungsaspekte konnte im Gegensatz zu den beiden Vorstudien ein signifikanter Unterschied der Kommissionierzeiten erreicht werden. Insbesondere durch die Anpassung der Informationsbereitstellung von Pick-by-Projection durch das Prinzip „weniger ist mehr“ (siehe Kap. 9.2.3) konnten bei der Kommissionierzeit sowie der subjektiven Beanspruchung positive Effekte erreicht werden. Dadurch ist Pick-by-Projection bei der Hauptstudie, im Gegensatz zu den Vorstudien, das Verfahren mit der kürzesten Kommissionierzeit. Diese positiven Veränderungen werden auch durch die Beobachtungen der Versuchsbetreuer bestätigt.

### ***Kommissionierfehlerrate***

Für die Kommissionierfehlerrate kann basierend auf statistischen Berechnungen ebenfalls die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen werden. Die Ergebnisse belegen somit, dass die Kommissionierfehlerrate von der Art der Informationsbereitstellung abhängig ist.

Ein Vergleich der Kommissionierfehlerrate bezogen auf die verschiedenen Systeme ergibt sowohl bei den sechs als auch bei den 21 Versuchsteilnehmern einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren. Damit kann gezeigt werden, dass mithilfe des neu entwickelten Assistenzsystems die Kommissionierfehlerrate im Vergleich zu den anderen Anleitungssystemen erheblich sinkt.

Trotzdem liegen die in der Laboruntersuchung ermittelten Kommissionierfehlerraten aller vier Systeme deutlich über den in der industriellen Anwendung üblichen Fehlerraten (siehe auch Kap. 9.2.1). Dies lässt sich auf verschiedene Gründe zurückführen wie beispielsweise die fehlende Erfahrung innerhalb der Kommissionierung, den kurzen Messzeitraum, die fehlende Übung mit den jeweiligen Systemen, aber auch auf die deutlich höhere mentale Beanspruchung der Versuchsteilnehmer im Kontext der Laboruntersuchung. Ein letzter Punkt ist der Wegfall von Wegstrecken, wodurch die Entnahme- und Identifikationsprozesse verdichtet und die kognitive Beanspruchung erhöht wurde, denn in der industriellen Praxis ist der Anteil an Wegstrecken deutlich größer und sonstige Tätigkeiten wie z.B. das Entfernen von Verpackungen, bieten eine Möglichkeit zur „kognitiven Erholung“ (vgl. Lolling 2003). Auch das Wissen, an einer Studie teilzunehmen, könnte vor allem bei der vorliegenden Nutzergruppe der leistungsgeminderten Menschen ein besonderer Stressfaktor sein, der das Fehlerrisiko erhöhen kann.

Neben den insgesamt höheren Fehlerraten sind aber auch die großen Streuungen der Fehlerhäufigkeiten der einzelnen Versuchsteilnehmer pro Anleitungssystem auffällig. So unterscheidet sich beispielsweise die kleinste und größte Fehlerrate bei der Kommissionierung mit dem Anleitungssystem Pick-by-Paper um den Faktor 48.

Diese große Varianz lässt sich zum einen durch die ohnehin große Variabilität der menschlichen Leistungsfähigkeit gegenüber technischen Systemen zurückführen (siehe Abbildung 10) und zum anderen auf die zusätzlich große Heterogenität hinsichtlich kognitiver, sensorischer und motorischer Leistungsfähigkeit (siehe Kap. 8.1.5) bei der vorliegenden Nutzergruppe.

### ***Subjektive Beanspruchung***

Die analytischen Auswertungen führen bei der subjektiven Beanspruchung für  $N=6$  zum Ergebnis, dass die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen wird. Für den Vergleich der Mittelwerte von Pick-by-Light und -Projection bei  $N=21$  konnte allerdings keine Signifikanz nachgewiesen werden. Anhand der deskriptiven Analyse ist jedoch ein Trend hin zu einer geringeren subjektiv erlebten Beanspruchung für Pick-by-Projection erkennbar. Diese Annäherung der subjektiv erlebten Beanspruchung bei den beiden Verfahren kann, neben der Reduzierung der Kommissionierzeiten, als weitere Folge der umgesetzten Gestaltungs- und Optimierungsmaßnahmen betrachtet werden. Denn durch die Reduzierung des informatorischen Gehalts nach dem Prinzip „weniger ist mehr“ hat sich der kognitive Aufwand für die Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung (siehe Kap. 6.5.2) bei Pick-by-Projection deutlich reduziert bzw. dem von Pick-by-Light angenähert. Die etwas geringere subjektive Beanspruchung bei Pick-by-Projection lässt sich wahrscheinlich auf die deutlich größere Darstellungsform des projizierten Lichtbalkens und die zusätzliche Navigationshilfe durch den projizierten Richtungspfeil zurückführen, der das Lokalisieren des nachfolgenden Entnahmeortes deutlich erleichtert.

Die sehr hohe subjektive Beanspruchung durch Pick-by-Paper und -Voice spiegelt die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Schwierigkeiten bei der Nutzung dieser beiden Systeme wider. Die durchgeführten Erhebungen müssen allerdings methodenkritisch betrachtet werden, da es Ergebnisunterschiede zwischen Labor- und Felduntersuchungen gibt (siehe Kap. 8.1.1).

Als elementare Ergebnisse sind nicht nur die Erkenntnisse und Veränderungen in Bezug auf die drei abhängigen Variablen zu sehen, sondern vor allem auch, dass es möglich ist, leistungsgeminderte Mitarbeiter durch eine adäquate Unterstützung dazu zu befähigen, industrielle Tätigkeiten erfolgreich und zuverlässig durchzuführen. Die manuelle Kommissionierung nach der PzW-Methode birgt durch ihren hohen Abwechslungsreichtum, die vielen unterschiedlichen manuellen Handhabungstätigkeiten und den weiterhin steigenden Bedarf an Mitarbeitern nämlich einerseits das Potenzial, einen Teil des bisherigen Mangels an Arbeitskräften durch leistungsgeminderte Menschen zu decken und eröffnet diesen andererseits eine neue Tätigkeitsperspektive sowie die Möglichkeit zur Teilhabe an industrieller Arbeit.

Abschließend kann auf Basis der generierten und ausgewerteten Ergebnisse die zentrale Zielsetzung aus Kapitel 8.1.4 als erfüllt betrachtet werden.

### **9.4 Abschließende Betrachtung der Evaluierungen**

Die vorgestellte Methodik bietet aus der Perspektive der Mensch-Maschine-Interaktion einen adäquaten Ansatz zur konzeptgeleiteten und strukturierten Evaluation der Gebrauchstauglichkeit und des Nutzens von Assistenzsystemen in der industriellen Anwendung. Aufgrund der vulnerablen Nutzergruppe ist es jedoch für den erfolgreichen Verlauf der Evaluierungen essentiell, dass neben den Versuchsbetreuern aus den technischen Disziplinen auch pädagogisches und psychologisches Betreuungs- und Fachpersonal anwesend ist und dieses die Versuchsbetreuer insbesondere bei der Erfassung der subjektiven Evaluationskriterien unterstützt.

Insbesondere bei Themen wie beispielsweise dem Abbruch von Versuchsdurchläufen mit einzelnen Personen oder der Änderung des Studiendesigns von vier Anleitungssystemen auf zwei Anleitungssysteme wurde dem Betreuungspersonal – neben dem technischen und methodischen Verständnis – eine hohe Sensibilität für die Versuchsteilnehmer und eine entsprechende Expertise über deren Verhaltensweise bzw. deren Verhaltensänderungen abverlangt.

Die Messung der Subkonstrukte Effektivität (anhand der erfassten Kommissionierfehler) und Effizienz (durch die gemessene Kommissionierzeit) konnte objektiv und ohne Einbezug der Versuchsteilnehmer erfolgen. Für die Erfassung der Beanspruchung und der Zufriedenheit waren jedoch häufig zusätzliche Erläuterungen und Paraphrasierungen erforderlich. Dabei zeigten sich die bildlichen Darstellungen des modifizierten NASA-TLX als hilfreiches Zusatzmedium für ein leichteres Verständnis der vier Antwortmöglichkeiten. Ungeachtet dessen könnte es hilfreich sein, die Messung der mentalen Beanspruchung bei weiteren Untersuchungen durch den Einsatz physiologischer (z.B. Messung der Herzschlagfrequenz) oder biochemischer (z.B. Messung des Adrenalinpiegels) Methoden zu ergänzen. Neben den eingesetzten quantitativen Methoden der Datenerhebung wurde das Verhalten der Nutzer vom pädagogisch-psychologischen Fachpersonal auf Basis von qualitativen Methoden der empirischen Sozialforschung analysiert. Dabei konnten nicht nur erweiterte Erkenntnisse zur Gebrauchstauglichkeit gewonnen werden, sondern zudem Rückschlüsse auf andere Teilbereiche des Lebens wie z.B. das Zusammenleben in Wohngemeinschaften, Freizeitaktivitäten wie Sport, Selbstständigkeit im Alltag, Selbstbewusstsein etc. gezogen werden, welche jedoch nicht mehr Teil der vorliegenden Arbeit sind.



Aber auch die bereits vorgestellten Auswertungen und Interpretationen der Evaluierungen konnten nur dank der Zusammenarbeit und dem inhaltlichen Austausch mit den pädagogischen und psychologischen Experten zielgruppengerecht erfolgen.

Durch diesen multimethodischen Ansatz der vorliegenden Untersuchung war ein mehrperspektivischer Blick auf den Nutzer sowie die Technik und deren Einsatz gewährleistet.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Erforschung, Entwicklung, Umsetzung und – im Zuge einer Evaluierung – der anschließende Einsatz eines nutzerzentrierten Assistenzsystems vorgestellt, das der Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern bei manuellen Kommissioniertätigkeiten dient. Im Mittelpunkt der gewählten Vorgehensweise stehen die Nutzer, im vorliegenden Fall Menschen mit einer Behinderung. Diesen soll durch das Assistenzsystem eine wirksame Einbeziehung in das Arbeitsleben ermöglicht und dadurch ihre Persönlichkeit gefördert werden. Darüber hinaus soll das Assistenzsystem einen Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen der Lebens- und Arbeitswelt des 21. Jahrhunderts leisten, insbesondere im Blick auf das Spannungsfeld der Anforderungen an WfbMs.

Die im Zuge dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Entwicklung von nutzerzentrierten Assistenzsystemen lässt sich in ein spiralförmiges Modell mit fünf Hauptschritten gliedern (siehe Abbildung 88): Dabei wird in einem ersten Schritt aus vorliegenden Herausforderungen eine Problemstellung abgeleitet. Anschließend erfolgt in einem zweiten Schritt eine Situationsanalyse, in der sowohl die Leistungsprofile der Nutzer, als auch die technischen Prozesse detailliert untersucht werden. In einem dritten Schritt werden daraus Anforderungen aus der Perspektive der Nutzer, der Technik und des Prozesses definiert und Zielsetzungen festgelegt. In einem vierten Schritt erfolgt die hard- und softwareseitige Konzeption, Auswahl einer Variante und Entwicklung der technischen Funktionseinheiten und des Anleitungssystems. Abschließend erfolgt im letzten Schritt die Realisierung des entwickelten Assistenzsystems. Iterativ zu dieser Vorgehensweise erfolgen je nach Bedarf und Kapazität Evaluierungen unter Einbindung von realen bzw. zukünftigen Nutzern sowie Experten.

Insbesondere die in Kapitel 5 spezifizierten Anforderungen in Bezug auf den Nutzer und die Technik sowie die in Kap. 8 entwickelte Vorgehensweise zur Evaluierung von Assistenzsystemen lassen sich überwiegend unmittelbar auf andere Entwicklungstätigkeiten im Bereich von Assistenzsystemen übertragen und dienen somit als Hilfestellung und Grundlage für weitere Arbeiten in diesem Bereich. Die vorgestellte Methodik zur Entwicklung und Evaluierung bietet aus der Perspektive der Mensch-Maschine-Interaktion einen Ansatz zur strukturierten und konzeptgeleiteten Evaluation der Gebrauchstauglichkeit und des Nutzens von Assistenzsystemen in industriellen Prozessen. Dieser Evaluationsansatz kann auch bei weiteren Untersuchungen in ähnlichen Bereichen eingesetzt werden. Durch die Triangulation unterschiedlicher methodischer Zugänge, die als Herangehensweise im technischen Bereich bislang wenig verbreitet ist, wurden die Perspektiven auf den untersuchten Gegenstand erweitert.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Einsatz eines nutzerzentrierten Assistenzsystems für manuelle Kommissioniertätigkeiten dazu dient, den Arbeitsprozess zuverlässiger und weniger beanspruchend zu gestalten. Das wird durch die intuitive Art der Informationsbereitstellung zur Anleitung der Arbeitstätigkeit und unter Einbeziehung der einzigartigen Fähigkeiten des Menschen ermöglicht. Darüber hinaus befähigt das Assistenzsystem leistungsgeminderte Menschen zur Teilhabe an Arbeit und unterstützt sie beim Erlernen und Durchführen neuer Aufgaben.

Die zu Beginn erläuterten aktuellen Rahmenbedingungen der Lebens- und Arbeitswelt verdeutlichen die Bedeutung des zukünftigen Einsatzes von informationstechnischen und kognitiven Assistenzsystemen. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Konzept sowie die daraus entstandene Lösung bieten eine gute Basis sowohl für die Weiterentwicklung des vorgestellten Assistenzsystems als auch für die Neuentwicklung von weiteren Unterstützungssystemen im Arbeits- und Lebensbereich.

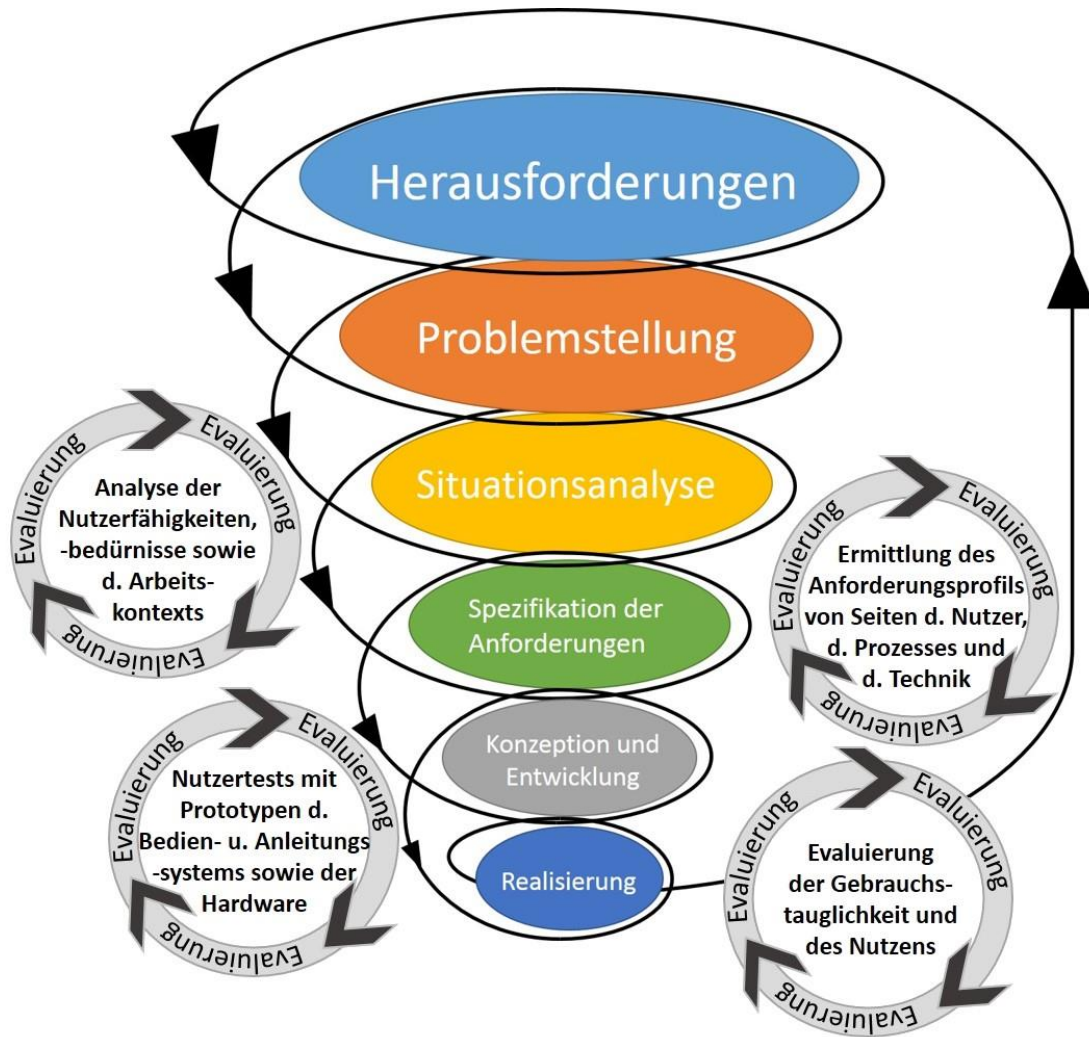


Abbildung 88: Entwicklungsverlauf für die nutzerzentrierte Gestaltung von Assistenzsystemen in der industriellen Anwendung

Für einen industriellen Einsatz der vorliegenden Systemlösung ist es unabdingbar, das Assistenzsystem adaptiv zu gestalten, denn dies stellt eine wesentliche Voraussetzung für einen individuellen, flexiblen sowie lern- und wandlungsfähigen Arbeitsplatz dar.

Neben der bisherigen Nutzergruppe ist auch eine Erweiterung und Anpassung des Assistenzsystems für zusätzliche Nutzergruppen wie z.B. leistungsgewandelte Mitarbeiter, zugewanderte Menschen oder auch normal leistungsfähige Mitarbeiter eine erfolversprechende Option.

Denn nur durch die Entwicklung und den Einsatz innovativer Technologie (wie dem hier entwickelten Kommissionierassistenzsystem) ist es deutschen Unternehmen in der heutigen Zeit und auch zukünftig möglich, erfolgreich im weltweiten Wettbewerb zu bestehen.

## Literaturverzeichnis

§ 136, SGB IX (19.06.2001): *Sozialgesetzbuch (SGB) Neuntes Buch (IX) – Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen – (SGB IX)*. Fundstelle: (BGBl. I S. 1046).

§ 81 Abs. 4, SGB IX (19.06.2001): *Sozialgesetzbuch (SGB) Neuntes Buch (IX) – Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen – (SGB IX)*. Fundstelle: (BGBl. I S. 1046).

A.S. (2004): *Voice-Systeme erobern verschiedene Einsatzfelder in der Logistik*. LOGISTIK für Unternehmen (10), S. 64–67.

American Evaluation Association (2004): *American Evaluation Association Guiding Principles for Evaluators*. Online verfügbar unter <http://www.eval.org/p/cm/ld/fid=51>, zuletzt geprüft am 12.08.2015.

Arnold, D.; Furmans, K. (2009): *Materialfluss in Logistiksystemen*. Berlin: Springer.

Azuma, R. T. (1997): *A Survey of Augmented Reality*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (4), S. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

Bächler, A.; Bächler, L.; Autenrieth, S.; Kurtz, P.; Heidenreich, T.; Hörz, T.; Krüll, G. (2015a): Entwicklung von Assistenzsystemen für manuelle Industrieprozesse. In: Rathmayer, S. und Pongratz, H. (Hg.): *DeLFI 2015. Proceedings der Pre-Conference Workshops der 13. E-Learning Fachtagung Informatik*. München, S. 57–64.

Bächler, L.; Bächler, A.; Kölz, M.; Hörz, T.; Heidenreich, T. (2015b): Über die Entwicklung eines prozedural-interaktiven Assistenzsystems für leistungsgeminderte und -gewandelte Mitarbeiter in der manuellen Montage. In: Jipp, M., Kluge, A., Söffker, D. und Wendemuth, A. (Hg.): 3. *Interdisziplinärer Workshop - Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten. Verstehen, Beschreiben und Gestalten Kognitiver (Technischer) Systeme*. Magdeburg.

Baechler, A.; Baechler, L.; Autenrieth, S.; Kurtz, P.; Hoerz, T.; Heidenreich, T.; Kruell, G. (2016a): A comparative study of an assistance system for manual order picking - called pick-by-projection - with the guiding systems pick-by-paper, pick-by-light and pick-by-display. In: *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. Koloa, USA: IEEE Computer Society Press, S. 523–531.

Baechler, A.; Baechler, L.; Autenrieth, S.; Kurtz, P.; Kruell, G.; Hoerz, T.; Heidenreich, T. (2016b): The development and evaluation of an assistance system for manual order picking - called pick-by-projection - with employees with cognitive disabilities. In: Miesenberger, K. (Hg.): *Proceedings of the 15th International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICHP)*. Linz, Austria. Cham: Springer, S. 321–328.

Baechler, A.; Baechler, L.; Kurtz, P.; Heidenreich, T.; Hoerz, T.; Kruell, G. (2015a): A Study About the Comprehensibility of Pictograms for Order Picking Processes with Disabled People and People with Altered Performance. In: Damiani, E., Howlett, R. J., Jain, L. C., Gallo, L. und Pietro, G. de (Hg.): *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services*. Cham: Springer, S. 69–80.

Baechler, A.; Kurtz, P.; Hoerz, T.; Kruell, G.; Baechler, L.; Autenrieth, S. (2015b): About the development of an interactive assistance system for impaired employees in manual order picking. In: Makedon, F. (Hg.): *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA)*. New York, USA: ACM.

- Baechler, L.; Baechler, A.; Funk, M.; Autenrieth, S.; Kruell, G.; Hoerz, T.; Heidenreich, T. (2016c): The use and impact of an assistance system for supporting participation in employment for individuals with cognitive disabilities. In: Miesenberger, K. (Hg.): *Proceedings of the 15th International Conference on Computers Helping People with Special Needs (ICCHP)*. Linz, Austria. Cham: Springer.
- bagwfbm (2013): *BAG WfbM - Menschen in Werkstätten*. Online verfügbar unter <http://www.bagwfbm.de/page/25>, zuletzt geprüft am 21.10.2015.
- Bahmann, W. (2013): *Werkzeugmaschinen kompakt. Baugruppen, Einsatz und Trends*. 21. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ballke, S. (2011): *Corporate Governance für Krankenhäuser*. Wiesbaden: Gabler.
- Baumann, H. (2013): *Order Picking Supported by Mobile Computing*. Dissertation. Universität Bremen. Fachbereich Mathematik und Informatik.
- Beauftragte der Bundesregierung für die Belange behinderter Menschen (2014): *Die UN-Behindertenrechtskonvention. Übereinkommen über die Rechte von Menschen mit Behinderungen*. Berlin.
- Berufsbildungswerk Waiblingen gGmbH: *hamet - Schulung und Entwicklung*. Online verfügbar unter <https://www.hamet.eu/>, zuletzt geprüft am 20.10.2016.
- Bevan, N. (1995): *Measuring usability as quality of use*. Software Quality Journal 4 (2), S. 115–130. DOI: 10.1007/BF00402715.
- Bleidick, U. (1999): *Behinderung als pädagogische Aufgabe. Behinderungsbegriff und behindertenpädagogische Theorie*. Stuttgart: Kohlhammer.
- BMWi (2013): *Engpassanalyse 2013. Besondere Betroffenheit in den Berufsfeldern Energie und Elektro sowie Maschinen- und Fahrzeugtechnik*. Berlin.
- Böckelmann, I.; Chegrynets, O.; Mecke, R.; Darius, S.; Sánchez Márquez, J. S. (2015): *Aufmerksamkeitsleistung und objektive Beanspruchung beim Einsatz von zwei verschiedenen Head-mounted-Displays*. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 65 (1), S. 12–20.
- Bokranz, R.; Landau, K. (2006): *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. MTM-Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Boppert, J. (2008): *Entwicklung eines wissensorientierten Konzepts zur adaptiven Logistikplanung*. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät für Maschinenwesen.
- Bortz, J. (1999): *Statistik. für Sozialwissenschaftler*. 5. Aufl. Berlin: Springer.
- Bortz, J.; Döring, N. (2009): *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Bortz, J.; Lienert, G. A. (2008): *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung. Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben*. 3. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Bortz, J.; Schuster, C. (2010): *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7. Aufl. Berlin: Springer.
- Bosch Rexroth AG (2009): *Ergonomieratgeber für Manuelle Produktionssysteme*. Online verfügbar unter [http://www.gfo-web.de/media/1968/5EWy2/3842523943\\_2015\\_05\\_de\\_ergonomieratgeber\\_media.pdf](http://www.gfo-web.de/media/1968/5EWy2/3842523943_2015_05_de_ergonomieratgeber_media.pdf), zuletzt geprüft am 08.08.2015.

Brackhane, R. (1996): *Rehabilitation im Beruf. Behinderte Menschen auf dem Arbeitsmarkt*. 2. Aufl. Leonberg: Rosenberger.

Brecher, C.; Weck, M.; Schmidt, S.; Epple, A.; Krömer, M. (2014): *Elemente der Werkzeugmaschinen*. In: Grote, K.-H. und Feldhusen, J. (Hg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 24. Aufl. Berlin: Springer, S. 1494–1528.

Bröder, A. (2010): *Versuchsplanung und experimentelles Praktikum*. Göttingen: Hogrefe.

Brosius, F.: *Kapitel 15 Explorative Datenanalyse*. Online verfügbar unter [http://www.molar.unibe.ch/help/statistics/SPSS/15\\_Explorative\\_Datenanalyse.pdf](http://www.molar.unibe.ch/help/statistics/SPSS/15_Explorative_Datenanalyse.pdf), zuletzt geprüft am 28.01.2016.

Bubb, H. (1992): *Menschliche Zuverlässigkeit. Definitionen, Zusammenhänge, Bewertung*. Landsberg/Lech: Ecomed.

Buchner, T. (2008): *Das qualitative Interview mit Menschen mit so genannter geistiger Behinderung. Ethische, methodologische und praktische Aspekte*. In: Biewer, G. (Hg.): *Begegnung und Differenz: Menschen - Länder - Kulturen. Beiträge zur Heil- und Sonderpädagogik*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, S. 516–528.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (2011): *Übereinkommen der Vereinten Nationen über Rechte von Menschen mit Behinderungen. Vom Bundeskabinett beschlossen am 3. August 2011*.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hg.) (2014): *Leichte Sprache. Ein Ratgeber*. Online verfügbar unter [http://www.gemeinsam-einfach-machen.de/SharedDocs/Downloads/DE/AS/UN\\_BRK/LS\\_EinRatgeber.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.gemeinsam-einfach-machen.de/SharedDocs/Downloads/DE/AS/UN_BRK/LS_EinRatgeber.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 24.10.2016.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2014): *Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland*. Online verfügbar unter [https://www.bmbf.de/pub/HTS\\_Broschure.pdf](https://www.bmbf.de/pub/HTS_Broschure.pdf), zuletzt aktualisiert am August 2014, zuletzt geprüft am 28.07.2016.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.) (2016): *Mensch-Technik-Kooperation: Assistenzsysteme zur Unterstützung körperlicher Funktionen — Mensch-Technik-Interaktion*. Online verfügbar unter <http://www.technik-zum-menschen-bringen.de/foerderung/bekanntmachungen/mensch-technik-kooperation-assistenzsysteme-zur-unterstuetzung-koerperlicher-funktionen>, zuletzt geprüft am 22.07.2016.

Bundesvereinigung Lebenshilfe e.V.: *Entwicklung und Förderung von Kindern mit Down-Syndrom*. Online verfügbar unter <https://www.lebenshilfe.de/wData/downloads/themen-recht/entwicklung.pdf>, zuletzt geprüft am 10.06.2016.

Burkschat, M.; Cramer, E.; Kamps, U. (2012): *Beschreibende Statistik. Grundlegende Methoden der Datenanalyse*. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Caritas: *Leichte Sprache. Lexikon*. Online verfügbar unter [www.caritas.de/cms/contents/carinetde/medien/dokumente/leichtesprache/leichtesprache-lexikon.pdf](http://www.caritas.de/cms/contents/carinetde/medien/dokumente/leichtesprache/leichtesprache-lexikon.pdf), zuletzt geprüft am 20.08.2015.

Caudell, T. P.; Mizell, D. W. (1992): Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*. Kauai, USA: IEEE Computer Society Press, S. 659–669.

CHeval: *Heuristische Evaluation*. Hg. v. Hochschule für Technik und Wirtschaft Chur. Schweizer Kompetenzzentrum für die Evaluation von Online-Angeboten. Online verfügbar unter <http://www.cheval-lab.ch/index.php?id=645&type=98>, zuletzt geprüft am 08.08.2016.

Crostack, H.-A.; Deuse, J. (2007): *Optimierung von Kommissionierung und Verpackung durch geeignete Strategien für die Qualitätsprüfung unter Berücksichtigung der Retourenabwicklung*. Dortmund. Online verfügbar unter [http://www.quinkom.de/Dokus/Endbericht\\_Quinkomv\\_final.pdf](http://www.quinkom.de/Dokus/Endbericht_Quinkomv_final.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2016.

Dahlbäck, N.; Jönsson, A.; Ahrenberg, L. (1993): *Wizard of Oz studies: why and how*. In: Gray, W. D., Hefley, W. E. und Murray, D. A. (Hg.): *Proceedings of the first International Workshop on Intelligent User Interfaces*. New York: Association for Computing Machinery, S. 193–200.

Denkena, B. (2003): *Grundlagen der Werkzeugmaschinen. 4 Linearführungen*. Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Universität Hannover. Online verfügbar unter <http://docplayer.org/10568808-Grundlagen-der-werkzeugmaschinen-4-linearfuehrungen.html>, zuletzt geprüft am 07.11.2015.

DGS; BDS (2014): *Ethik-Kodex der Deutschen Gesellschaft für Soziologie (DGS) und des Berufsverbandes Deutscher Soziologinnen und Soziologen (BDS)*. Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Soziologie und Berufsverband Deutscher Soziologinnen und Soziologen e.V. Online verfügbar unter [http://bds-soz.de/BDS/fachgruppen/ethik/Ethik-Kodex\\_Satzung\\_141003.pdf](http://bds-soz.de/BDS/fachgruppen/ethik/Ethik-Kodex_Satzung_141003.pdf), zuletzt geprüft am 09.08.2016.

DIMDI (2005): *ICF. Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit*. Neu-Isenburg: Med. Medien-Informations-GmbH.

DIN 32977:1992-07: Behinderungsgerechtes Gestalten - Teil 1.

DIN 33402:2008-03: Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 1: Begriffe, Messverfahren.

DIN EN ISO 12100:2011-03: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010).

DIN EN ISO 6385:2004-05: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen (ISO 6385:2004).

DIN EN ISO 7250:2016-05: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 1: Körpermaßdefinitionen und -messpunkte (ISO/DIS 7250-1:2016).

DIN EN ISO 9000:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015).

DIN EN ISO 9001:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2015).

DIN EN ISO 9241-11:1999-01: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11.

DIN EN ISO 9241-110:2008-09: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006).



DIN EN ISO 9241-210:2011-01: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010).

Doose, S. (2012): *Unterstützte Beschäftigung: Berufliche Integration auf lange Sicht. Theorie, Methodik und Nachhaltigkeit der Unterstützung von Menschen mit Lernschwierigkeiten auf dem allgemeinen Arbeitsmarkt*. 3. Aufl. Marburg: Lebenshilfe-Verlag.

DUDEN. *Die deutsche Rechtschreibung* (2009). 25. Aufl. Mannheim: Dudenverlag.

Eid, M.; Gollwitzer, M.; Schmitt, M. (2013): *Statistik und Forschungsmethoden*. 3. Aufl. Weinheim: Beltz.

Eilers, K.; Nachreiner, F.; Hänecke, K. (1986): *Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften 40 (4), S. 215–224.

Faulkner, L. (2003): *Beyond the five-user assumption: Benefits of increased sample sizes in usability testing*. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers 35 (3), S. 379–383. DOI: 10.3758/BF03195514.

Fischer, E.; Kießling, C.; Monár-Gebert, T. (2016): *Inklusion und Teilhabe von Menschen mit geistiger Behinderung auf dem allgemeinen Arbeitsmarkt*. Oberhausen: ATHENA.

Fischer, J. H. (1994): *Zero-defect-picking*. In: VDI-Berichte 1131 (Hg.). Düsseldorf: VDI, S. 11–22.

Frehe, H. (2005): *Das arbeitsrechtliche Verbot der Diskriminierung behinderter Menschen*. In: Bieker, R. (Hg.): *Teilhabe am Arbeitsleben. Wege der beruflichen Integration von Menschen mit Behinderung*. Stuttgart: Kohlhammer, S. 62–80.

Fritz Kübler GmbH: *Lösungen für die lineare Messtechnik*. Online verfügbar unter [https://www.kuebler.com/PDFs/kataloge\\_publikationen/Lineare\\_Messtechnik\\_D.pdf](https://www.kuebler.com/PDFs/kataloge_publikationen/Lineare_Messtechnik_D.pdf), zuletzt geprüft am 11.11.2015.

Funk, M.; Bächler, A.; Bächler, L.; Korn, O.; Krieger, C.; Heidenreich, T.; Schmidt, A. (2015): *Comparing Projected In-Situ Feedback at the Manual Assembly Workplace with Impaired Workers*. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Corfu, Greece: ACM.

Gehrmann, M. (2012): *Die Qualifizierung von Werkstattbeschäftigten auf ausgelagerten Werkstattarbeitsplätzen im Restaurant und Hotel Forsthaus Paulsborn. Ein Modellprojekt der Berliner Mosaik-Services*. Integrationsgesellschaft mbH 2009-2012. Berlin.

George, U. (2008): *Kollektive Erinnerung bei Menschen mit geistiger Behinderung. Das kulturelle Gedächtnis des nationalsozialistischen Behinderten- und Krankenmordes in Hadamar: eine erinnerungssoziologische Studie*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.

Gerke, W. (2014): *Technische Assistenzsysteme. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: De Gruyter.

Goeke, S. (2010): *Frauen stärken sich. Empowermentprozesse von Frauen mit Behinderungserfahrung: eine Studie im Stil der Grounded Theory Methodology*. Marburg: Lebenshilfe-Verlag.

Götz, A. (2007): *Zukunftsstandort Deutschland?* Automobil-Produktion 20 (2), S. 16–19.

Gudehus, T. (2012): *Logistik 2. Netzwerke, Systeme und Lieferketten*. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Günther, P. (2006): *Intralogistik - eine starke Branche stellt sich vor*. In: Arnold, D. (Hg.): *Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Berlin: Springer.
- Günthner, W. A. (2016): *Veröffentlichungen des Lehrstuhls fml an der TUM*. Online verfügbar unter [http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set\\_ID=88](http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=88), zuletzt geprüft am 21.07.2016.
- Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R.; Schedlbauer, M. (2009): *Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung*. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.
- Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Kraul, R.; Schneider, O. (2008): Technologie für die Logistik des 21. Jahrhunderts. In: Wimmer, T. und Wöhner, H. (Hg.): *Kongressband zum 25. Deutschen Logistik-Kongress*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, S. 360–393.
- Günthner, W. A.; Heptner, K. (2007): *Technische Innovationen für die Logistik*. München: Huss.
- Günthner, W. A.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P. (2014): *Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0*. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 297–323.
- Günthner, W. A.; Schedlbauer, M.; Wulz, J. (2004): *Augmented Reality in der innerbetrieblichen Logistik*. wt Werkstattstechnik-online (7-8), S. 363–365.
- Guo, A.; Raghu, S.; Xie, X.; Ismail, S.; Luo, X.; Simoneau, J. et al. (2014): A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list. In: Dunne, L., Martin, T. und Beigl, M. (Hg.): *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC)*. New York, USA: ACM, S. 71–78.
- Haberhauer, H.; Bodenstein, F. (2014): *Maschinenelemente. Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. 17. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- Haberl, D. (2009): *Der Mensch in der Kommissionierung*. In: Pulverich, M. und Schietinger, J. (Hg.): *Handbuch Kommissionierung. Effizient picken und packen*. München: Vogel, S. 156–213.
- Hacker, W.; Sachse, P. (2014): *Allgemeine Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Tätigkeiten*. 3. Aufl. Göttingen: Hogrefe.
- Hahn-Woernle, C. (2006): *Herausforderungen an die Intralogistik in modernen Distributionszentren*. In: Arnold, D. (Hg.): *Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Berlin: Springer, S. 101–113.
- Hansen, W. J. (1971): User engineering principles for interactive systems. In: Unknown (Hg.): *The May 16-18, 1972, Spring Joint Computer Conference*. Atlantic City, New Jersey. Montvale, N. J.: AFIPS Press, S. 523–532.
- Hart, S. G. (2006): NASA-TASK LOAD INDEX (NASA-TLX); 20 YEARS LATER. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting*. Santa Monica: HFES, S. 904–908.
- Hart, S. G.; Staveland, L. E. (1988): *Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research*. In: Hancock, P. A. und Meshkati, N. (Hg.): *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press, S. 139–183.
- Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H. (2002): *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 13. Aufl. München: Oldenbourg.

- Heijkoop, J. (2014): *Herausforderndes Verhalten von Menschen mit geistiger Behinderung. Neue Wege der Begleitung und Förderung*. 6. Aufl. Weinheim: Beltz Juventa.
- Hennecke, F. (2016): *Nutzerzentrierte Entwicklung*. Online verfügbar unter <http://www.cebitaward.de/der-cebit-innovation-award/aus-der-praxis/im-dialog-mit-dem-nutzer.html>, zuletzt geprüft am 24.10.2016.
- Hensel, U. (2001): *Qu An Ta. Qualitätssicherung der Angebote in der Tagesförderung für erwachsene Menschen mit geistiger Behinderung*. Marburg: Lebenshilfe-Verlag.
- Heuer, J. (2003): *Expertenevaluation*. In: Heinsen, S. und Vogt, P. (Hg.): *Usability praktisch umsetzen. Handbuch für Software, Web, Mobile Devices und andere interaktive Produkte*. München: Hanser, S. 116–135.
- Hirsch, A. (2012): *Werkzeugmaschinen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Hompel, M. ten; Sadowsky, V.; Beck, M. (2011): *Kommissionierung. Materialflusssysteme 2 – Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Berlin: Springer.
- Hompel, M. ten; Schmidt, T. (2008): *Warehouse-Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen*. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- Hörz, T.; Korn, O.; Kölz, M. (2013): *Abschlussbericht Innovative Projekte/ Kooperationsprojekte, Assistenzsysteme für leistungseingeschränkte Mitarbeiter in der manuellen Montage*. Baden-Württemberg: Koordinierungstelle Forschung der Hochschulen für Angewandte Wissenschaften.
- Jääskeläinen, K.; Nevala, N. (2012): *Use of Assistive Technology in Workplaces of Employees with Physical and Cognitive Disabilities*. In: Miesenberger, K. (Hg.): *Computers helping people with special needs. Proceedings of the 13th International Conference*. Berlin: Springer, S. 223–226.
- Jacobs, B.; Welter, H. (1992): *Grundzüge caritativer Werkstattarbeit*. Zeitschrift für Caritasarbeit und Caritaswissenschaft 12 (3), S. 568–574.
- Johnston, P.; Lyn, J.; Stainton, T.; Drynan, D. (2014): *Can assistive technology help people with disabilities obtain employment? An examination of overcoming barriers to participation in British Columbia, Canada*. International Journal of Disability, Community & Rehabilitation 13 (1).
- Jünemann, R. (1989): *Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Berlin: Springer.
- Jungermann, H.; Fischer, K.; Pfister, H.-R. (2010): *Die Psychologie der Entscheidung. Eine Einführung*. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum.
- Kammergruber, F.; Günthner, W. A. (2011): *VR-LogPlan. Virtual Reality Logistik-Planungssystem*. Forschungsbericht. München.
- Kleppmann, W. (2013): *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 8. Aufl. München: Hanser.
- Koether, R. (2014): *Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Korn, O. (2014): *Context-Aware Assistive Systems for Augmented Work. A Framework Using Gamification and Projection*. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme.

- Kubek, V. (2012): *Humanität beruflicher Teilhabe im Zeichen der Inklusion. Kriterien für die Qualität der Beschäftigung von Menschen mit Behinderungen*. Wiesbaden: Springer.
- Laga, G. (1982): *Methodologische und methodische Probleme bei der Befragung geistig Behinderter*. In: Heinze, R. G. und Runde, P. (Hg.): *Lebensbedingungen Behinderter im Sozialstaat*. Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 223–239.
- Laga, G.; Lauffer, B. (1980): *Meinungslosigkeit im Interview*. Informationen der Arbeitsgemeinschaft für interdisziplinäre angewandte Sozialforschung 8 (3), S. 227–236.
- Lanc, O. (1975): *Ergonomie. Psychologie der technischen Welt*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Lang, S. (2007): *Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion*. Bamberg: Meisenbach.
- Lawo, M. (2016): *Veröffentlichungen von Michael Lawo*. Online verfügbar unter [http://ai.uni-bremen.de/team/michael\\_lawo](http://ai.uni-bremen.de/team/michael_lawo), zuletzt geprüft am 21.07.2016.
- Lolling, A. (2003): *Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten*. Dissertation. Universität Dortmund.
- Lotter, B. (2012): *Einführung*. In: Lotter, B. und Wiendahl, H.-P. (Hg.): *Montage in der industriellen Produktion*. 2. Aufl. Berlin: Springer, S. 1–8.
- LUCA GmbH (2016). Online verfügbar unter <http://www.luca.eu/de/pick-by-point>, zuletzt geprüft am 11.07.2016.
- Luczak, H.; Volpert, W.; Raeithel, A.; Schwier, W. (1989): *Arbeitswissenschaft. Kerndefinition, Gegenstandskatalog, Forschungsgebiete*. 3. Aufl. Köln: RKW-Verlag.
- Machate, J.; Burmester, M. (2003): *User Interface Tuning. Benutzungsschnittstellen menschlich gestalten*. Frankfurt am Main: Software- und Support-Verlag.
- Mackowiak, J.; Goldscheid, C. (2005): *Ganzheitliche Bewertung und Optimierung manueller Arbeitsplätze in Kommissioniersystemen*. Dortmund: Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben).
- Marquardt, H.-G.; Schütze, O. (1994): Entwicklungsrichtungen beim Kommissionieren. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): *Kommissionieren in Industrie und Handel. Sparen mit intelligenten Lösungen*. Nürnberg. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 1–10.
- Maschke, M. (2008): *Behindertenpolitik in der Europäischen Union. Lebenssituation behinderter Menschen und nationale Behindertenpolitik in 15 Mitgliedstaaten*. Wiesbaden: Springer.
- Menk, J. (1999): *Beitrag zur Planung qualitätsfähiger Kommissioniersysteme - ein humanorientierter Ansatz -*. Dortmund: Praxiswissen.
- Milberg, J. (2003): *acatech Jahresbericht 2002/2003*. Hg. v. acatech. acatech-Konvent für Technikwissenschaften der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. München. Online verfügbar unter [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/jahresbericht/acatech\\_Jahresbericht\\_2002-2003.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/jahresbericht/acatech_Jahresbericht_2002-2003.pdf), zuletzt geprüft am 28.07.2016.

- Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F. (1994): *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. In: Das, H. (Hg.): *Proceedings of SPIE Conference on Telem manipulator and Telepresence Technologies*. Boston, Massachusetts: SPIE Press, S. 282–292.
- Moosbrugger, H. (2012): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Morris, C. (1946): *Signs, Language, and Behavior*. New York: Prentice Hall.
- Mosteller, F.; Tukey, J. W. (1977): *Data analysis and regression. A second course in statistics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Muschiol, J. (2013): *Universal Communication Model for the Future Society*. In: Horbach, M. (Hg.): *Informatik 2013 - Informatik angepasst an Mensch, Organisation und Umwelt. Tagung vom 16. - 20. September 2013 in Koblenz, Germany*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., S. 1690–1703.
- Nave, M. (2009): *Einführung und Grundlagen*. In: Pulverich, M. und Schietinger, J. (Hg.): *Handbuch Kommissionierung. Effizient picken und packen*. München: Vogel, S. 16–29.
- Neugebauer, R. (2012): *Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin: Springer Vieweg.
- Neuhäuser, G.; Steinhausen, H.-C.; Häßler, F.; Sarimski, K. (2013): *Geistige Behinderung. Grundlagen, Erscheinungsformen und klinische Probleme, Behandlung, Rehabilitation und rechtliche Aspekte*. 4. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer.
- Nielsen, J. (1993): *Usability engineering*. Boston: Academic Press.
- Nielsen, J. (2001): *Usability Metrics*. Online verfügbar unter <http://www.nngroup.com/articles/usability-metrics/>, zuletzt geprüft am 24.06.2016.
- Papst Johannes Paul II. (1981): *Enzyklika LABOREM EXERCENS. "Über die menschliche Arbeit"*. Bonn.
- Pataki, K.; Schulze Kissing, D.; Mahlke, S.; Thüring, M. (2005): *Anwendung von Usability-Maßen zur Nutzenbewertung von Fahrerassistenzsystemen*. In: Karrer, B. Gauss, B. & Ch. Steffens (Hg.): *Beiträge zur Mensch-Maschine-Systemtechnik aus Forschung und Praxis*. Düsseldorf: Symposion Publishing, S. 211–228.
- Patron, C. (2004): *Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung*. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät für Maschinenwesen.
- Polasek, W. (1994): *EDA Explorative Datenanalyse. Einführung in die deskriptive Statistik*. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Porst, R. (2014): *Fragebogen. Ein Arbeitsbuch*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer.
- Ramdoss, S. T. (2013): *Assistive technology can play an instrumental role in improving employment outcomes of people with cognitive disabilities, but the support strategies and solutions that have the potential to promote success in work place remain unexplored*. Evidence-Based Communication Assessment and Intervention 7 (1), S. 4–6. DOI: 10.1080/17489539.2013.827491.
- Rammelmeier, T.; Galka, S.; Günthner, W. A. (2012): *Fehlervermeidung in der Kommissionierung*. Hg. v. Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik. Logistics Journal. Online verfügbar unter <http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/2012-09%20Fehlervermeidung%20in%20der%20Kommissionierung.pdf>, zuletzt geprüft am 25.08.2014.
- REFA (1991): *Methodenlehre der Betriebsorganisation. Arbeitspädagogik*. 3. Aufl. München: Hanser.

- Reichel, J. (2016): *SSI Schäfer: Pick by Watch für mehr Effizienz. Mit einer Smart-Watch am Handgelenk soll das Person-zu-Ware-Kommissionieren noch schneller von statten gehen*. Hg. v. Logistra-Das Praxismagazin für Nfz-Fuhrpark und Lagerlogistik. Online verfügbar unter <http://www.logistra.de/news-nachrichten/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik/7178/test-amp-technik/ssi-schaefer-pick-watch-fuer-mehr-effizienz>, zuletzt geprüft am 12.11.2016.
- Reif, R. (2009): *Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems*. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät für Maschinenwesen.
- Reinhart, G.; Zäh, M. F. (2014): *Assistenzsysteme in der Produktion*. wt Werkstattstechnik-online 104 (9), S. 516.
- Richter, K. (2015): *Kommissionier-Arbeitsplatz. Definition und wirtschaftliche Bedeutung*. In: Schenk, M. (Hg.): *Produktion und Logistik mit Zukunft. Digital Engineering and Operation*. Berlin: Springer Vieweg, S. 119–130.
- Roethlisberger, F. J.; Dickson, W. J. (1975): *Management and the worker. An account of a research program conducted by the Western Electric Company, Hawthorne Works, Chicago*. 16. print. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press.
- Rohmert, W. (1993): *Arbeitswissenschaft*. In: Köhler, R. (Hg.): *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft*. 5. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 120–131.
- Rooch, A. (2014): *Statistik für Ingenieure. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich*. Berlin: Springer.
- Rose, S. (2007): *Die Integration von Menschen mit Lernschwierigkeiten. Aus der Werkstatt für behinderte Menschen auf den allgemeinen Arbeitsmarkt. Am Beispiel der Integrationsfachdienste*. [Place of publication not identified]: Grin Verlag.
- Rubin, J. (1994): *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. New York: John Wiley & Sons.
- Sachs, L. (2004): *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*. 11. Aufl. Berlin: Springer.
- SAFELOG GmbH (2016). Online verfügbar unter <http://www.safelog.de/de/poka-yoke-loesungen/intralogistik-loesungen/>, zuletzt geprüft am 11.07.2016.
- Sarimski, K. (2001): *Kinder und Jugendliche mit geistiger Behinderung*. Göttingen: Hogrefe.
- Sarimski, K. (2009): *Wer hat Angst vorm Erbsenzählen? Quantitative Forschung für Menschen mit geistiger Behinderung - eine Zeitschriftenanalyse 2000-2007*. In: Janz, F. und Terfloth, K. (Hg.): *Empirische Forschung im Kontext geistiger Behinderung*. Heidelberg: Winter, S. 21–34.
- Sarodnick, F.; Brau, H. (2011): *Methoden der Usability Evaluation. Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung*. 2. Aufl. Bern: Huber.
- Sauer, A. L.; Parks, A.; Heyn, P. C. (2010): *Assistive technology effects on the employment outcomes for people with cognitive disabilities: A systematic review*. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology 5 (6), S. 377–391. DOI: 10.3109/17483101003746360.
- Schädler, J. (2003): *Stagnation oder Entwicklung in der Behindertenhilfe? Chancen eines Paradigmenwechsels unter Bedingungen institutioneller Beharrlichkeit*. Hamburg: Kovač.

- Schäfers, M. (2008): *Lebensqualität aus Nutzersicht. Wie Menschen mit geistiger Behinderung ihre Lebenssituation beurteilen*. Wiesbaden: Springer.
- Schawel, C.; Billing, F. (2012): *Morphologischer Kasten*. In: Schawel, C. und Billing, F. (Hg.): *Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers Von ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 174–176.
- Schenk, J.; Rigoll, G. (2010): *Mensch-Maschine-Kommunikation. Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen*. Heidelberg: Springer.
- Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H. (2010): *Arbeitswissenschaft*. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- Schlick, C. M. (2016): *Veröffentlichungen von Christopher M. Schlick*. Online verfügbar unter [http://www.iaw.rwth-aachen.de/index.php?article\\_id=187&publog=c.schlick&dbid=2&aktiv=1](http://www.iaw.rwth-aachen.de/index.php?article_id=187&publog=c.schlick&dbid=2&aktiv=1), zuletzt geprüft am 21.07.2016.
- Schmauder, M.; Spanner-Ulmer, B. (2014): *Ergonomie - Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. München: Hanser.
- Schmid, I. (2003): *Zum Einfluss spielorientierter Bewegungsangebote auf die Motorik Erwachsener Menschen mit einer geistigen Behinderung und ihr Beitrag zur Förderung von Alltagskompetenzen*. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Fakultät Philosophie.
- Schmidtke, H.; Bernotat, R. (1993): *Ergonomie*. 3. Aufl. München: Hanser.
- Schubert, H.-J. (1996): *Arbeitsgestaltung für behinderte Menschen*. In: Zwielerlein, E. (Hg.): *Handbuch Integration und Ausgrenzung. Behinderte Mitmenschen in der Gesellschaft*. Neuwied: Luchterhand, S. 510–515.
- Schulte, J. (1993): *Praxis des Kommissionierens. Warenfluß ohne Reibungsverluste: Handbuch für die betriebliche Praxis*. Augsburg: Königsbrunner Seminare.
- Schuntermann, M. F. (2007): *Einführung in die ICF. Grundkurs, Übungen, offene Fragen*. 2. Aufl. Landsberg/Lech: ecomed Medizin.
- Schuppener, S. (2005): *Selbstkonzept und Kreativität von Menschen mit geistiger Behinderung*. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.
- Schweibenz, W.; Thissen, F. (2003): *Qualität im Web. Benutzerfreundliche Webseiten durch Usability Evaluation*. Berlin: Springer.
- Schwerdtfeger, B. (2009): *Pick-by-Vision: Bringing HMD-based Augmented Reality into the Warehouse*. Dissertation. Technische Universität München. Fakultät für Informatik.
- Schwerdtfeger, B.; Pustka, D.; Hofhauser, A.; Klinker, G. (2008): Using laser projectors for augmented reality. In: Feiner, S. (Hg.): *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*. Bordeaux, France. New York: ACM, S. 134–137.
- Seifert, M. (2006): *Lebensqualität von Menschen mit schweren Behinderungen. Forschungsmethodischer Zugang und Forschungsergebnisse*. Zeitschrift für Inklusion-online.net (2). Online verfügbar unter <http://www.inklusion-online.net/index.php/inklusion-online/article/view/186/186>, zuletzt geprüft am 24.10.2016.
- Seyfried, E. (1990): *Neue Wege der beruflichen Integration Behinderter*. Heidelberg: Winter.

- Seyl, K.-H. (1996): *Die Bedeutung der Werkstätten für Behinderte*. In: Zwierlein, E. (Hg.): *Handbuch Integration und Ausgrenzung. Behinderte Mitmenschen in der Gesellschaft*. Neuwied: Luchterhand, S. 536–546.
- Shneiderman, B. (1979): *Human Factors Experiments in Designing Interactive Systems*. Computer 12 (12), S. 9–19. DOI: 10.1109/MC.1979.1658571.
- Spanner-Ulmer, B. (2012): *Der Mensch in der Arbeitswelt der Zukunft*. Faktor Mensch in der Automobilproduktion. Stuttgart, 03.07.2012.
- Speck, O. (1999): *Menschen mit geistiger Behinderung und ihre Erziehung. Ein heilpädagogisches Lehrbuch*. 9. Aufl. München: E. Reinhardt.
- Speck, O. (2013): *Geistige Behinderung*. In: Theunissen, G., Kulig, W. und Schirbort, K. (Hg.): *Handlexikon Geistige Behinderung. Schlüsselbegriffe aus der Heil- und Sonderpädagogik, Sozialen Arbeit, Medizin, Psychologie, Soziologie und Sozialpolitik*. 2. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer, S. 147–149.
- Spee, D. (2009): *Systematik der Kommissioniersysteme*. In: Pulverich, M. und Schietinger, J. (Hg.): *Handbuch Kommissionierung. Effizient picken und packen*. München: Vogel, S. 30–54.
- Starner, T. (2016): *Thad Starner Home*. Online verfügbar unter <http://www.cc.gatech.edu/home/thad/>, zuletzt aktualisiert am 07.07.2016, zuletzt geprüft am 21.07.2016.
- Statistisches Bundesamt (2009): *Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 18. November 2009 in Berlin. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204099004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204099004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 24.10.2016.
- Steland, A. (2013): *Basiswissen Statistik. Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*. 3. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Günthner, W. A.; Dangelmaier, W. (2005): *Trends und Strategien in der Logistik. Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010*. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH.
- Sudhop, T.; Reber, M. (2004): *Grundlagen der Biometrie. Beschreibende und schließende Statistik in klinischen Studien*. Workshop Biometrie - Beschreibende und schließende Statistik in klinischen Studien. Universität Bonn. Berlin, 2004. Online verfügbar unter [http://www.agah.eu/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Workshop-Grundlagen-Biometrie-Reber-Sudhop.pdf](http://www.agah.eu/fileadmin/_migrated/content_uploads/Workshop-Grundlagen-Biometrie-Reber-Sudhop.pdf), zuletzt geprüft am 11.09.2015.
- Terfloth, K.; Janz, F. (2009): *Forschung im Kontext geistiger Behinderung*. In: Janz, F. und Terfloth, K. (Hg.): *Empirische Forschung im Kontext geistiger Behinderung*. Heidelberg: Winter, S. 9–19.
- Tukey, J. W. (1977): *Exploratory data analysis*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co.
- Ubimax GmbH (2016): *Augmented Reality und xPick*. Online verfügbar unter <http://www.ubimax.de/index.php/de/products#solutions>, zuletzt geprüft am 14.07.2016.
- Unger, H. v.; Narimani, P.; M'Bayo, R. (2014): *Forschungsethik in der qualitativen Forschung. Reflexivität, Perspektiven, Positionen*. Wiesbaden: Springer.



- Use Tree - Berliner Kompetenzzentrum für Usability-Maßnahmen (2014): *Usability-Test (Nutzertest)*. Online verfügbar unter <http://www.usetree.de/wp-content/uploads/2014/09/Usability-Test.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2015.
- VDI - Richtlinie 4490:2007-05: Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand.
- VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1:1994-04: Kommissioniersysteme Grundlagen Blatt 1/3.
- VDI-Richtlinie 3590, Blatt 2:2002-07: Kommissioniersysteme Systemfindung Blatt 2/3.
- VDI-Richtlinie 3657:1993-07: Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen.
- Vogel Business Media GmbH & Co. KG (2015): *Montage-Assistenzsystem steigert die Prozesssicherheit*. Online verfügbar unter <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/montage-assistenzsystem-steigert-die-prozesssicherheit-a-514451/>, zuletzt geprüft am 22.07.2016.
- Voigt, K.-I.; Saatmann, M.; Schorr, S. (2007): *Vom Build-to-Stock zum Build-to-Order: Flexibilitätswirksame Auswirkungen auf die Supply Chain*. In: Günthner, W. A. (Hg.): *Neue Wege in der Automobillogistik*. Berlin: Springer, S. 63–86.
- Wagner-Willi, M. (2002): *Verlaufskurve "Behinderung". Gruppendiskussionen mit Beschäftigten einer "Werkstatt für Behinderte"*. Berlin: Logos.
- Wannenwetsch, H. H. (2002): *E-Supply-Chain-Management. Grundlagen, Strategien, Praxisanwendungen*. Wiesbaden: Gabler.
- Weineck, J. (2010): *Sportbiologie*. 10. Aufl. Balingen: Spitta.
- Weiß, C. (2007): *Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA*. München: Oldenbourg.
- Wiedenmaier, S. J. (2004): *Unterstützung manueller Montage durch Augmented Reality-Technologien*. Dissertation. RWTH Aachen.
- Wiesbeck, M. (2013): *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Wille, M.: *Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes. Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs*. Hg. v. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund.
- Wöfle, M. (2014): *Kontextsensitive Arbeitsassistenzsysteme zur Informationsbereitstellung in der Intralogistik*. Dissertation. Technische Universität München.
- Wüllenweber, E. (2006): *Skizzen zur Forschung in Bezug auf Menschen mit geistiger Behinderung. Einbeziehen der geistig behinderten Menschen in den Forschungsprozess*. In: Wüllenweber, E., Theunissen, G. und Mühl, H. (Hg.): *Pädagogik bei geistigen Behinderungen. Ein Handbuch für Studium und Praxis*. Stuttgart: Kohlhammer, S. 566–572.
- Zühlke, D. (2012): *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Useware-Engineering für technische Systeme*. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Zwierlein, E. (1997): *Zur Bedeutung der Erwerbsarbeit*. In: Niehaus, M. und Montada, L. (Hg.): *Behinderte auf dem Arbeitsmarkt. Wege aus dem Abseits*. Frankfurt: Campus, S. 18–27.

## Anhang

### Anhang A: Ablauf eines konventionellen Kommissionierprozesses nach der Person-zur-Ware-Methode

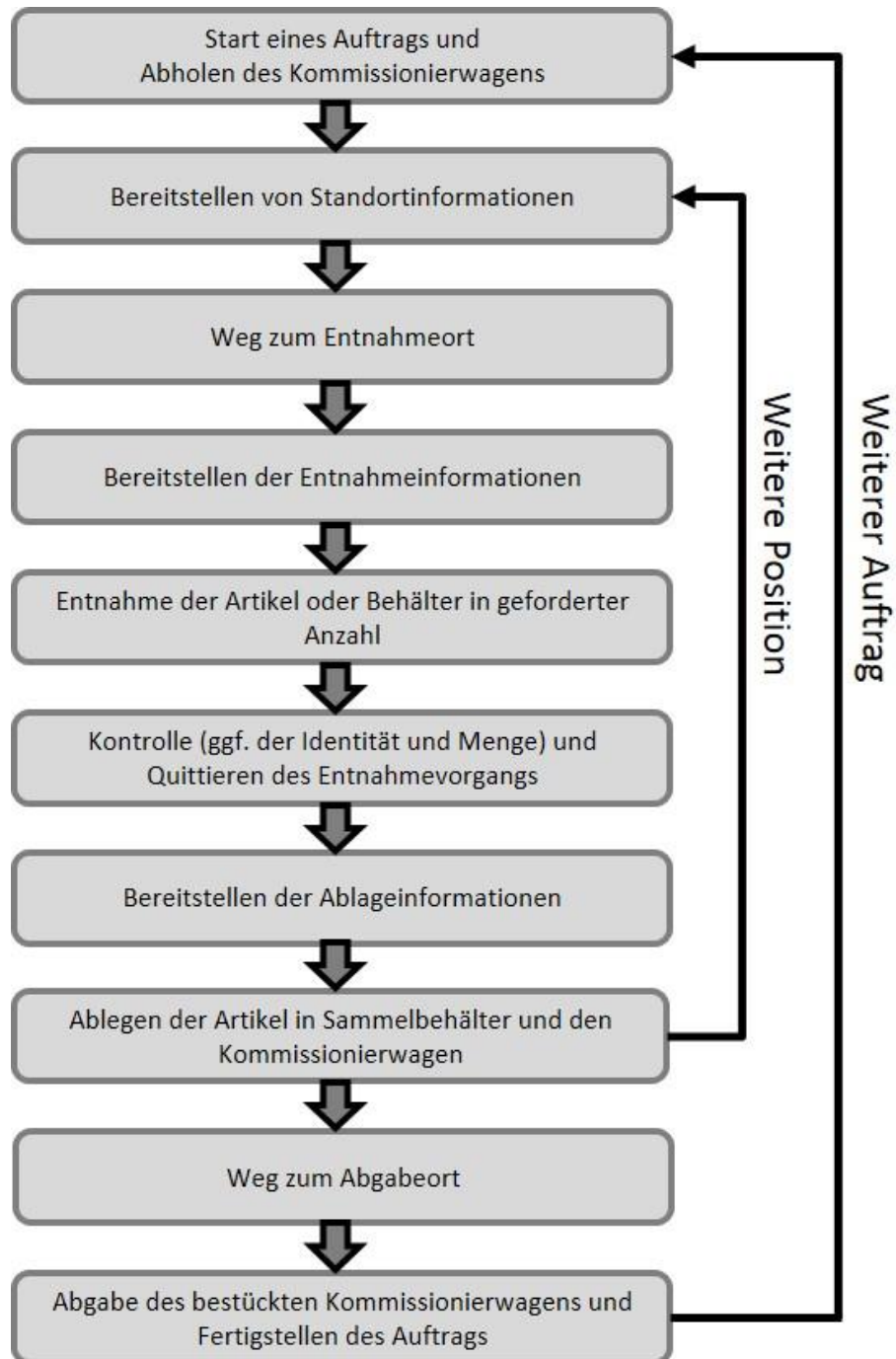


Abbildung 89: Ablauf eines konventionellen Kommissionierprozesses nach der Person-zur-Ware-Methode im industriellen Umfeld (vgl. Richter 2015; Wölflle 2014)

## Anhang B: Fragebogen zur Erhebung der Nutzerbedürfnisse und -fähigkeiten

Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems



Gemeinnützige Werkstätten und Wohnstätten GmbH

**Hochschule Esslingen**  
University of Applied Sciences



System zur Effizienzsteigerung und  
Assistenz bei Produktionsprozessen  
in Unternehmen auf Basis von  
Bewegungserkennung und Projektion

### Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

<b>Name, Vorname des Mitarbeiters<sup>1</sup>:</b>	
<b>Geburtsdatum, Alter:</b>	
<b>Geschlecht:</b>	
<b>Art der Beeinträchtigung</b> (psychisch, geistig oder körperlich eingeschränkt)	
<b>Detaillierte Beschreibung der Beeinträchtigung</b> (z.B. Sinnesbeeinträchtigung, körperliche Beeinträchtigung, geistige Beeinträchtigung, Lernbehinderung,...)	
<b>Name, Vorname der Fachkraft:</b>	
<b>Datum, Ort:</b>	

#### Fragebogenbegleittext:

Bei dem vorliegenden Fragebogen geht es um eine Einschätzung des Mitarbeiters für ein Assistenzsystem bei Kommissionierprozessen im Rahmen eines Forschungsprojekts.

**Definition Kommissionieren** (nach VDI 3590): Kommissionieren ist das Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen (Artikel) aus einer Gesamtmenge (Sortiment) aufgrund von Bedarfsinformationen (Auftrag).

**Bitte lesen Sie folgende Beschreibung des Assistenzsystems durch und kreuzen Sie die für den Mitarbeiter zutreffende Antwort an. Geben Sie, falls möglich, eine individualisierte Begründung hierfür an.**

Der Einsatz des Assistenzsystems soll Funktionsbeeinträchtigungen des Mitarbeiters kompensieren, sodass einerseits diese ausgeglichen und andererseits die bestehenden Fähigkeiten gefördert werden und somit zum bestmöglichen Einsatz kommen.

Ziel des Assistenzsystems ist eine Verbesserung des Arbeitsprozesses, der Arbeitszufriedenheit und die Vermeidung von gesundheitlichen Problemen.

Durch das Assistenzsystem erhält der Mitarbeiter situationsbezogen und gedächtnisunterstützend Assistenz, welche ihn im Arbeitsprozess angemessen unterstützt. Das System beinhaltet auf eine konkrete Aufgabe zugeschnittene Funktionen und Bedienungsabläufe und verdeutlicht

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

verständliche Informationen zur Umsetzung einer konkreten Aufgabe (Bsp.: Bauteil- und Kleinladungsträgerentnahme bzw. –ablage in geforderter Menge). Schritt für Schritt kann der Mitarbeiter somit auch umfangreiche Kommissionieraufträge zusammenstellen, da das System gezielt in der Entnahme und Ablage anleitet bzw. Fehler erkennt und den nächsten Arbeitsschritt nur bei vorher korrekt ausgeführter Tätigkeit vorgibt.

Die Abbildung 1 (nachfolgende Seite) zeigt das oben beschriebene Assistenzsystem für Kommissionierprozesse, durch welches der Mitarbeiter genaue Arbeitsanweisungen erhält und somit dazu befähigt wird selbständig, auch umfangreiche Kommissionieraufträge zusammenzustellen.

Ein am Regal angebrachter Bildschirm (Touchdisplay) dient zum Aufrufen und Starten von neuen Kommissionieraufträgen. Nach dem Öffnen eines Auftrages wird mithilfe eines über dem Regal angebrachten Projektors dem Mitarbeiter farblich angezeigt, aus welcher Position (diese wird grün beleuchtet) er einen kompletten Kleinladungsträger (KLT) bzw. aus welchem KLT er Einzelteile entnehmen soll. Nach korrekt erfolgter Entnahme wird dem Mitarbeiter im nachfolgenden Schritt angezeigt, wo er den KLT bzw. die Teile auf der Waage ablegen soll. Die Waage kontrolliert dann die korrekte Anzahl der zu kommissionierenden Bauteile. Bei Übereinstimmung der geforderten Menge wird dem Mitarbeiter im nächsten Schritt angezeigt, an welcher Position er den KLT im Kommissionierwagen ablegen soll. Dabei wird die Ablageposition, ebenfalls mit einem über dem Kommissionierwagen angebrachten zweiten Projektor, angeleuchtet.

Nach korrekter Ablage des KLT im Kommissionierwagen wird dem Mitarbeiter der nachfolgende Entnahmevorgang angezeigt. Dieser Ablauf wird solange durchgeführt bis der Auftrag komplett abgewickelt ist.

Schritt für Schritt erhält der Mitarbeiter also genaue Anweisungen, welches Teil er wo entnehmen muss und wo bzw. wie dieses zu positionieren ist, bis der komplette Kommissionierauftrag zusammengestellt ist.

Wird ein Teil aus einem falschen Ladungsträger oder ein KLT aus einer falschen Position entnommen, so wird dieses/r rot beleuchtet, um dem Mitarbeiter zu signalisieren, dass er „falsch“ greift.

Stimmt der SOLL-IST Vergleich einer geforderten Menge an Einzelteilen in einem KLT nicht überein, wird dem Mitarbeiter dies auf dem Monitor angezeigt und kein nächster Arbeitsschritt vorgegeben, bis eine Übereinstimmung vorliegt.

Das System erkennt also mithilfe eines angebrachten Infrarotsensors Fehler und gibt nur bei vorher korrekt ausgeführter Tätigkeit weitere Anweisungsschritte.

Das Assistenzsystem ist mobil und wird während dem Kommissioniervorgang zusammen mit dem Kommissionierwagen entlang des Regals mitgeführt. Nach der vollständigen Zusammenstellung eines Auftrags wird der Kommissionierwagen von der verschiebbaren Assistenzeinheit abgekoppelt und zum Montagearbeitsplatz überführt.

Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

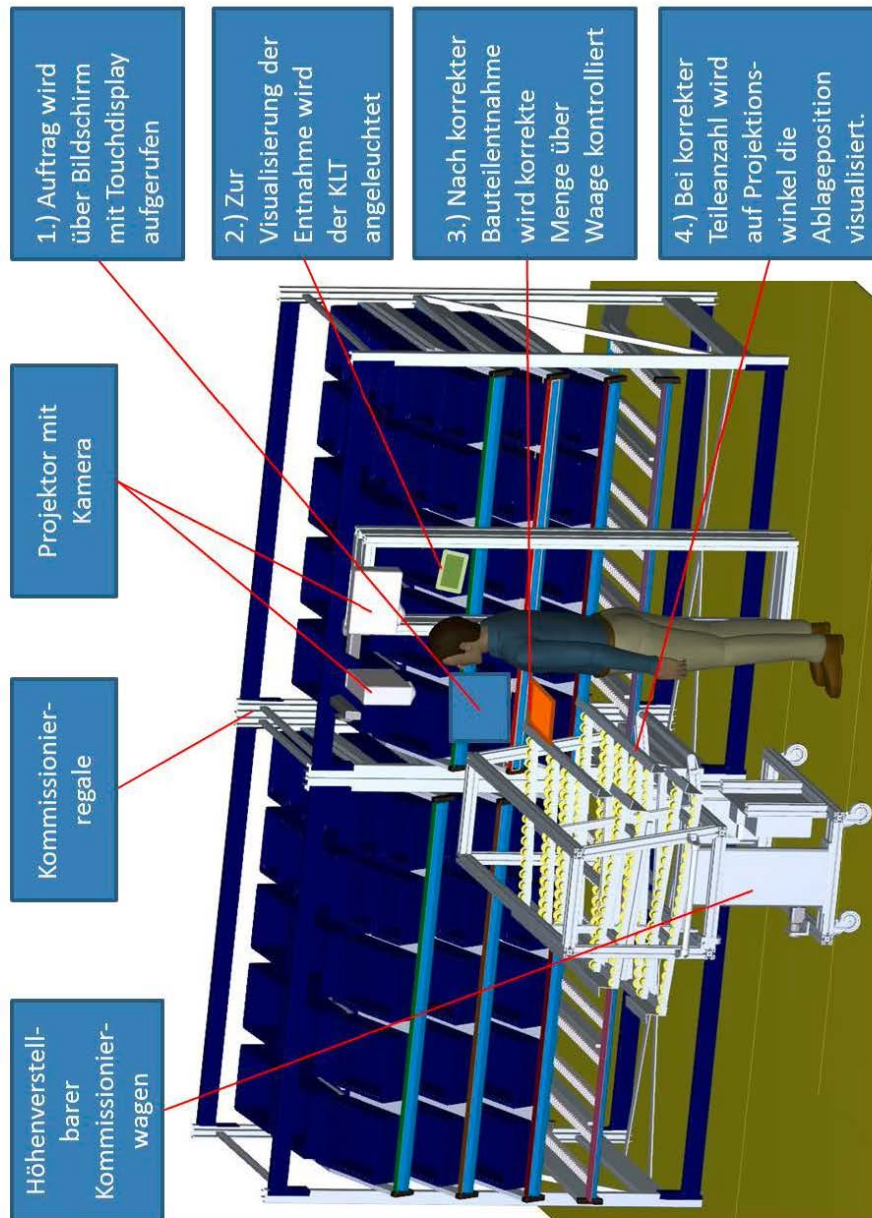


Abbildung 1: Darstellung des Kommissioniersystems

Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

### 1. Persönlicher Nutzen

<b>Glauben Sie der Mitarbeiter könnte bei Kommissioniertätigkeiten von einem beschriebenen Kommissionierassistenzsystem unterstützt werden/profitieren, um eine Kommissioniertätigkeit durchzuführen?</b>	
<b>JA</b> <input type="radio"/>	<b>NEIN</b> <input type="radio"/>
Begründung:	

<b>Wenn NEIN (oben), welche Unterstützungsbedingungen wären notwendig, um den Mitarbeiter selbstständig eine Kommissioniertätigkeit durchführen zu lassen?</b>
Beschreibung:

### 2. Motorische und kognitive Leistungen

<b>Trauen Sie es dem Mitarbeiter kognitiv zu, an einem Assistenzsystem für Kommissionierprozesse zu arbeiten?</b>	
<b>JA</b> <input type="radio"/>	<b>NEIN</b> <input type="radio"/>
Begründung:	

<b>Wie stark sind die kognitiven Fähigkeiten des Mitarbeiters nach Ihrer Einschätzung eingeschränkt?</b>				
keine Einschränkung <input type="radio"/>	leichte Einschränkung <input type="radio"/>	mittlere Einschränkung <input type="radio"/>	starke Einschränkung <input type="radio"/>	sehr starke Einschränkung <input type="radio"/>

<b>Trauen Sie es dem Mitarbeiter motorisch zu, an einem Assistenzsystem für Kommissionierprozesse zu arbeiten?</b>	
<b>JA</b> <input type="radio"/>	<b>NEIN</b> <input type="radio"/>
Begründung:	

Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

**Wie stark sind die motorischen Fähigkeiten des Mitarbeiters nach Ihrer Einschätzung eingeschränkt?**

keine Einschränkung <input type="radio"/>	leichte Einschränkung <input type="radio"/>	mittlere Einschränkung <input type="radio"/>	starke Einschränkung <input type="radio"/>	sehr starke Einschränkung <input type="radio"/>
---	---	--	--	---

### 3. Farbunterscheidung

**Ist der Mitarbeiter in der Lage, zwei Farben (z.B. grün und rot) voneinander zu unterscheiden und kann er diese richtig zuordnen (z.B. grün steht für richtig, rot steht für falsch)?**

JA <input type="radio"/>	NEIN <input type="radio"/>
Begründung:	

### 4. Wahrnehmung akustischer Reize

**Ist der Mitarbeiter in der Lage zwei akustische Signale (z.B. „Diiing“ und „Piieep“) voneinander zu unterscheiden und kann er diese richtig zuordnen (z.B. „Diiing“ steht für richtig, „Piieep“ steht für falsch)?**

JA <input type="radio"/>	NEIN <input type="radio"/>
Begründung:	

### 5. Einhalten einer Reihenfolge und befolgen von Anweisungen

**Ist der Mitarbeiter in der Lage, eine Reihenfolge von Entnahmeschritten einzuhalten und einfache Anweisungen, welche das System ihm vorgibt, zu befolgen?**

JA <input type="radio"/>	NEIN <input type="radio"/>
Begründung:	



Kurzfragebogen zum Einsatz eines Kommissionierassistenzsystems

## 6. Zahlenverständnis

**Ist der Mitarbeiter in der Lage, Zahlen zu lesen und ihnen eine Anzahl richtig zuzuordnen zu können (z.B. an Hand der Entnahmemenge)?**

**JA** ☐

Wenn **JA**, bis zu welcher Zahlenhöhe ist er dazu in der Lage (z.B. Zahlen bis 3, 10, 20, ...)?

**NEIN** ☐

Begründung:

## 7. Unterstützungsbedarf

**Was denken Sie, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit der Mitarbeiter gerne und effektiv am Assistenzsystem für Kommissionierprozesse arbeitet? Worauf sollte besonders geachtet werden? (eine direkte Unterstützung durch Fachpersonal, Licht, Lautstärke, Arbeitshaltung, regelmäßige Pausen, Anleitung durch Zahlen, Bilder, Videos, Animationen,...)**

## 8. Sonstige Anmerkungen

**Hier ist Platz für alles was in den vorhergehenden Fragen nicht abgefragt wurde, Ihnen aber für die Entwicklung des Assistenzsystems als wichtig erscheint.**

**Vielen herzlichen Dank für das Ausfüllen des Kurzfragebogens!**






## Anhang C: Modifizierter NASA-TLX

### Fragebogen zur Beanspruchung

Teilnehmer Nr.	Arbeitsaufgabe	Datum
	Kommissioniersysteme:	
	<input type="checkbox"/> Pick-by-light <input type="checkbox"/> Pick-by-voice <input type="checkbox"/> Pick-by-paper <input type="checkbox"/> Pick-by-projection	

#### Geistige Anforderung

War die Anleitung einfach oder kompliziert?

			
<i>Sehr einfach</i>			<i>Sehr kompliziert</i>



#### Körperliche Anforderung

War die Anleitung erholsam oder anstrengend?

			
<i>Sehr erholsam</i>			<i>Sehr anstrengend</i>

#### Zeitliche Anforderung

War die Anleitung langsam und ruhig oder schnell und hektisch?

			
<i>Sehr ruhig</i>			<i>Sehr hektisch</i>

### Fragebogen zur Beanspruchung





#### **Leistung**

Wie gut oder schlecht konntest Du die Anleitung ausführen?

Sehr gut     Sehr schlecht

#### **Anstrengung**

Wie entspannend oder anstrengend war es die Aufgabe zu erledigen?

Sehr entspannend     Sehr anstrengend

#### **Frustration**

Wie zufrieden oder verärgert warst Du während der Aufgabe?

Sehr zufrieden     Sehr verärgert

## Anhang D: Fragebogen zur Evaluierung eines Kommissionierassistenzsystems

Fragebogen zur Evaluierung eines Kommissionierassistenzsystems

### Fragebogen zur Evaluierung eines Kommissionierassistenzsystems

Sehr geehrte Studienteilnehmerin, sehr geehrter Studienteilnehmer,

im Rahmen dieser Studie soll der Nutzen eines Assistenzsystems für Kommissionierprozesse gemessen und ein etwaiger Fortschritt zum aktuellen Stand der Technik überprüft werden. Dabei wird nicht Ihre Leistung erfasst, sondern die Zeit, die Fehlerrate und die Beanspruchung der getesteten Systeme miteinander verglichen. Die Auswertung des Fragebogens erfolgt völlig anonym.

Sie würden uns sehr unterstützen, wenn Sie die Fragen möglichst umfassend und gewissenhaft beantworten.

Vielen Dank für ihre Hilfe.

#### 1. Angaben zur Person:

Teilnehmernummer: \_\_\_\_\_

Geschlecht: männlich ☐ weiblich ☐

Alter: \_\_\_\_\_ Jahre

Haben Sie eine Sehschwäche?

Ja ☐ Welcher Art? \_\_\_\_\_ Nein ☐

Wie groß sind Sie? \_\_\_\_\_ cm

Hat Ihr/e Ausbildung/ Studium/ Beruf einen technischen Hintergrund?

Ja ☐ Nein ☐

Wie lautet die Bezeichnung Ihrer aktuellen Tätigkeit? \_\_\_\_\_

Wie gut sind Ihre PC-Kenntnisse? (von 1= sehr gut bis 6= ungenügend)

1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐

Haben Sie bereits Erfahrung mit Kommissioniersystemen?

Ja ☐ Welches System ? \_\_\_\_\_ Nein ☐

Fragebogen zur Evaluierung eines Kommissionierassistenzsystems

## 2. Fragen zum Kommissionierassistenzsystem

	Stimmt über- haupt nicht	Stimmt weit- gehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt ein wenig	Stimmt weit- gehend	Stimmt genau
Die Gewöhnung an das neue System fiel mir leicht						
Die Nutzung des Systems war nach kurzer Zeit verständlich						
Die Anordnung der eingeblendeten Informationen war übersichtlich						
Die Einblendung der Informationen direkt in den Arbeitsbereich hilft Fehler zu vermeiden						
Das zusätzliche Display wirkt störend						
Das System erleichtert das Aufsuchen/ Vergleichen der Lagerplatz-Nr./ des Artikels						
Das Verschieben des Systems war sehr kraftaufwändig						
Die Lesbarkeit der Informationen ist gut						
Die Arbeit mit dem System war interessant						
Die Darstellungsart erleichtert das Finden der benötigten Informationen						
Die Arbeit mit dem Assistenzsystem hat mir Spaß gemacht						
Die Arbeit mit dem Gerät erfordert Übung						
Die dargestellten Piktogramme/ Informationselemente waren leicht verständlich?						
Die verwendeten Piktogramme/ Informationselemente waren zur Anleitung der auszuführenden Tätigkeit hilfreich?						

Fragebogen zur Evaluierung eines Kommissionierassistenzsystems

**Bitte bewerten Sie die verschiedenen Systeme von 1 bis 4 (Bestes System=1, Schlechtestes System=4):**

Insgesamt

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

Leicht zu lernen

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

Komfort

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

Geschwindigkeit

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

Fehlervermeidung

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

**Mit welchem System könnten Sie sich vorstellen auch über einen längeren Zeitraum zu arbeiten? (1 bis 4)**

Pick-by-paper ☐      Pick-by-Light ☐      Pick-by-Voice ☐      Pick-by-Projection ☐

**Das hat mir gefallen:**

**Meine Verbesserungsempfehlungen:**

## Anhang E: Einverständniserklärung

### Einverständniserklärung

## Sind Sie damit ein\_VERSTANDEN?

### Einverständniserklärung

Liebe/r Frau/ Herr \_\_\_\_\_

Sie sind eingeladen, an einer Erprobung teilzunehmen.



Ihre Teilnahme dauert ca. 45 Minuten.



In dieser Zeit dürfen Sie mit verschiedenen Anleitungen Bauteile aus einem Regal in einen Wagen sortieren.

Bild 1 zeigt wie der Arbeitsplatz aussieht. Bild 2 zeigt den Wagen



*Bild 1: Aus diesem Regal entnehmen Sie Teile*



*Bild 2: In diesen Wagen legen Sie die Teile*

Die gleiche Aufgabe dürfen Sie mit 4 verschiedenen Anleitungen machen.

Es gibt die Anleitung auf einem Blatt Papier, auf einem Bildschirm, mit einer Stimme über Kopfhörer und mit leuchtenden Flächen.

Ich werde Ihnen alle Anleitungen erklären, vormachen und danach dürfen Sie es ausprobieren.

Wenn Sie etwas nicht verstehen, dürfen Sie immer sofort fragen.

### Einverständniserklärung



Jetzt würde ich Ihnen gerne noch 4 Fragen stellen.

Bitte antworten Sie, indem Sie hierfür JA oder NEIN ankreuzen.

Hier ein Beispiel:

JA  NEIN 



Ich würde Ihnen gerne zusehen wenn Sie Bauteile sortieren.

Sind Sie damit einverstanden? JA  NEIN 



Damit ich mir alles merken kann würde ich gerne Fotos und Videos davon machen. Wenn Sie möchten bekommen Sie diese auch.

Sind Sie damit einverstanden? JA  NEIN 



Gerne würde ich Ihnen einige Fragen stellen wie zum Beispiel:

„Wie finden Sie es Bauteile zu sortieren?“



Einzelne Fotos würde ich gerne in einer Zeitschrift oder einem Buch zeigen.

Sind Sie damit einverstanden? JA  NEIN 



Alle Beobachtungen, Fotos und Videoaufnahmen werden natürlich vertraulich behandelt. Ihr Name wird nirgendwo erscheinen, auch wenn die Ergebnisse in einer Zeitschrift oder einem Buch aufgeschrieben werden sollten.



Wenn Sie noch Fragen haben, dürfen Sie mir diese immer stellen.

Auch wenn Sie sich ärgern oder nicht zufrieden sind dürfen Sie das sagen.

Sie können sich mit Ihren Fragen aber auch gerne an Frank Raschhofer wenden.

## Einverständniserklärung



Sie müssen nicht alle Fragen beantworten, wenn Sie das nicht wollen.



Wenn Sie mit allem einverstanden sind, dürfen Sie das mit Ihrer Unterschrift bestätigen.

Unterschrift: \_\_\_\_\_



Danach ist die Teilnahme trotzdem freiwillig. Das bedeutet Sie können jederzeit gehen wenn Sie nicht mehr teilnehmen wollen.

Vielen **DANK**, dass Sie uns vertrauen und bei der Erprobung teilnehmen!

Wir freuen uns sehr darüber.



## Anhang F: Checkliste Studienablauf

### Checkliste Studienablauf

#### 1. Begrüßung (Alle, ca. 5 min)

- a. **Vorstellung Forschungsinhalte:** In dem Forschungsprojekt werden Unterstützungssysteme für verschiedene manuelle Industrieprozesse entwickelt. Diese sollen zur Unterstützung von leistungsgeminderten Mitarbeitern dienen.
- b. **Studienziel:** Das Ziel des Tests ist es, zu überprüfen, ob das entwickelte System bei der Kommissionierung unterstützt und hilfreich/nützlich für Sie als Mitarbeiter ist.
- c. **Studienbeschreibung:** Heute dürfen Sie an einem Test von verschiedenen Unterstützungssystemen für Kommissionierprozesse teilnehmen. Dabei werden Schraubzwingeneinzelteile mit der Unterstützung von vier Anleitungskonzepten aus einem Regal entnommen und in einem bereitgestellten Transportwagen einsortiert. Dieser Prozess wird auch Kommissionierung genannt. Die vier Unterstützungssysteme sind eine Anleitung durch Projektion (Pick-by-Projection), durch eine Papierliste (Pick-by-Paper), durch ein Kopfhörer/Headset mit Stimmenanweisung (Pick-by-Voice) und durch Lichtsignale (Pick-by-Light).
- d. **Datenerfassung:** Es wird nicht die eigene Leistung bewertet, sondern der Nutzen und die Beanspruchung des jeweiligen Systems im Vergleich zu den anderen bewertet und getestet. Dazu werden Zeiten und die Fehlerrate gemessen. Zusätzlich werden Fragebögen ausgefüllt. Alle Daten wie Zeiten, Fehler und Beanspruchung werden anonym und nicht personenbezogen erfasst und gespeichert. Die Daten werden nur für wissenschaftliche Zwecke verwendet. Dasselbe gilt für Bilder und Videos, welche jedoch nur nach vorheriger Zustimmung gemacht werden.
- e. **Rechte der Teilnehmer:** Die Teilnahme an dem Test ist freiwillig und die Teilnahme kann jederzeit und ohne Begründung abgebrochen werden.

#### 2. Versuchsaufbau (Alle, ca. 5 min)

- a. Der Aufbau besteht aus zwei Durchlaufregallagern und einem Kommissionierwagen.
- b. Ein Regallager besteht aus vier Ebenen und fünf Kanälen. Die oberen drei Ebenen sind für die Materialbereitstellung und die unterste Ebene für die Rückführung der Leerbehälter. Die Materialbereitstellung unterteilt sich wiederum in eine Einzelteilentnahme (oberste Ebene) und eine Gesamtbehälterentnahme (die beiden mittleren Ebenen). Somit stehen insgesamt 30 Lagerplätze zur Verfügung.
- c. Der Kommissionierwagen besteht ebenfalls aus zwei Ebenen mit insgesamt neun Ablagekanälen. Die Kanäle ganz links in der oberen und unteren Ebene sind für die Bereitstellung von Leerbehältern.
- d. Die Lagerkanäle sind, falls erforderlich, mit einer Nummer versehen. Diese setzt sich folgendermaßen zusammen:
  - i. Erste Zahl: Nummer des Regallagers (von rechts nach links), beim Kommissionierwagen gibt es noch den Zusatz „W“ vor der ersten Zahl
  - ii. Zweite Zahl: Nummer der Regalreihe (von rechts nach links)
  - iii. Dritte Zahl: Nummer der Regalebene (von unten nach oben)
- e. Der Wagen muss an eine verschiebbare Einheit angedockt werden, die anschließend beim Kommissioniervorgang mitgeschoben wird und eine definierte Führung und Position des Wagens ermöglicht.

## Checkliste Studienablauf

### 3. Allgemeiner Versuchsablauf (Alle, ca. 5 min)

- a. Es gibt vier verschiedene Durchläufe mit je einem System (Pick-by-Light, Pick-by-Paper, Pick-by-Projection, Pick-by-Voice). Die Systemreihenfolge und der Arbeitsinhalt unterscheiden sich bei jedem Teilnehmer und Durchlauf.
- b. Für den Durchlauf mit einem System werden ca. 5-15 min. benötigt. Im Anschluss werden zwei bzw. drei Fragebögen für jedes Unterstützungssystem ausgefüllt.
- c. Der Wagen muss immer mitgeschoben und darf nicht stehen gelassen werden.
- d. Leerbehälter befinden sich in den zwei Kanälen ganz links im Kommissionierwagen.
- e. Der Versuch startet und endet jeweils in der gekennzeichneten Fläche, dort steht zu Beginn auch der Kommissionierwagen bereit.
- f. Die sieben wartenden Teilnehmer werden durch einen pädagogischen Mitarbeiter in einem Aufenthaltsraum betreut und bei Bedarf einzeln ins Labor begleitet.
- g. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung findet eine kurze Abschlussrunde statt, in der offene Fragen der Teilnehmer beantwortet werden, die Möglichkeit zu Feedback gegeben wird und der Dank an die Teilnehmer ausgesprochen wird.

### 4. Versuchsablauf Einzelsysteme (Einzeln, ca. 40-80 min.)

- a. Vor Beginn der Versuchsdurchführung muss von jedem Teilnehmer eine Einverständniserklärung ausgefüllt werden.
- b. Des Weiteren erfolgen für jeden Teilnehmer und jedes System eine detaillierte Einweisung zum jeweiligen System und ein anschließender Probelauf mit drei Positionen.
- c. Im Anschluss an jeden Versuchsdurchlauf wird mit jedem Teilnehmer ein Fragebogen zur Beanspruchung (NASA-TLX) durch das jeweilige System ausgefüllt.
- d. Nach der Durchführung des ersten Systems wird zusätzlich zum Beanspruchungs-Fragebogen ein Fragebogen zu den personenbezogenen Daten des Teilnehmers ausgefüllt.
- e. Nach dem Versuchsdurchlauf mit dem Assistenzsystem (Pick-by-Projection) wird ein zusätzlicher Fragebogen zur Bewertung dieses Systems gestellt.
- f. Nach dem vierten Versuchsdurchlauf wird ein Fragebogen zur Priorisierung der Systeme ausgefüllt.
- g. Die Reihenfolge der vier Systeme wechselt randomisiert (siehe hinten angehängte Grafik und Tabelle) durch, um potenzielle Lerneffekte auszugleichen.
- h. **Pick-by/Put-to-Light:**
  - i. Der jeweilige Entnahme-oder Ablageort wird durch blau leuchtende LEDs angezeigt.
  - ii. Nach der Entnahme oder dem Ablegen muss durch Betätigen des Druckknopfes der Prozess quittiert werden.
  - iii. Nach der Entnahme muss jede Kiste kurz auf der Waage abgestellt und anschließend an der Ablageposition abgelegt werden.
  - iv. Aufsuchen des nachfolgenden Entnahme-oder Ablageortes anhand der leuchtenden LED.
  - v. Der Kommissionierwagen muss immer zur nachfolgenden Entnahmeposition mitgeschoben werden und darf nicht an einem Ort stehen gelassen werden / verbleiben.

## Checkliste Studienablauf

### i. Pick-by-Paper:

- i. Die für die Kommissionierung erforderlichen Informationen werden über eine Papierliste bereitgestellt.
- ii. Die Identifizierung der Entnahme- und Zielorte erfolgt anhand einer Lagernummer, die vor jedem Kanal gut lesbar befestigt ist.
- iii. Nach Durchführung des Entnahmevorgangs wird die Position auf der Papierliste abgehakt.
- iv. Nach der Entnahme muss jede Kiste kurz auf der Waage abgestellt und anschließend an der Ablageposition abgelegt werden.
- v. Der Kommissionierwagen muss immer zur nachfolgenden Entnahmeposition mitgeschoben werden und darf nicht an einem Ort stehen gelassen werden / verbleiben.

### j. Pick-by-Projection:

- i. Die Darstellung von Pfeilen (nach links oder rechts zeigend) auf den vier Projektionsflächen an den Regalebenen weist auf die Verschieberichtung und den Verschiebeprozess des Kommissionierwagens bis zur nachfolgenden Entnahmeposition hin.
- ii. Das Aufleuchten eines grünen Balkens auf Regalseite signalisiert die Entnahme eines gesamten Behälters. Das Aufleuchten eines grünen Balkens auf Kommissionierwagenseite signalisiert die Ablageposition im Wagen.
- iii. Das Aufleuchten eines grünen Balkens mit einer zusätzlichen Ziffer und dem Wortzusatz „Stk.“ signalisiert die Entnahme von Einzelteilen in der vorgegebenen Stückzahl.
- iv. Nach der korrekten Gesamtbehälterentnahme aus dem Regal wird die Ablageposition auf der Waage grün ausgeleuchtet. Bei der Einzelteilentnahme wird der auf der Waage abgestellte Behälter so lange angeleuchtet bis die korrekte Stückzahl erreicht ist. Sobald die geforderte Stückzahl erreicht ist, erlischt die Projektion des Entnahmefachs und der Waage und die anschließende Ablageposition wird angeleuchtet.

### k. Pick-by-Voice:

- i. Die für die Kommissionierung erforderlichen Informationen werden über ein Headset mit Stimmausgabe dargeboten/bereitgestellt.
- ii. Die Identifizierung der Entnahme- und Zielorte erfolgt anhand einer Lagernummer, die vor jedem Kanal gut lesbar befestigt ist.
- iii. Um die entsprechenden Informationen erneut abspielen zu lassen, muss der Begriff „Wiederholen“ gesagt werden.
- iv. Nach der Entnahme muss jede Kiste kurz auf der Waage abgestellt und anschließend an der Ablageposition abgelegt werden.
- v. Der Kommissionierwagen muss immer zur nachfolgenden Entnahmeposition mitgeschoben werden und darf nicht an einem Ort stehen gelassen werden / verbleiben.

## Anhang G: Deskriptive Statistik der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

Tabelle 16: Deskriptive Statistik der Kommissionierzeiten mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

	Pick-by-Paper	Pick-by-Light	Pick-by-Voice	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	6	6	6	6
Arithmetisches Mittel in s	934,83	441,50	771,17	385,50
Standardabweichung in s	625,71	139,65	417,43	102,40
Spannweite in s	1485	398	1052	304
Minimum in s	495	275	373	251
Maximum in s	1980	673	1425	555
Erstes Quartil in s	510,00	326,00	459,00	320,00
Median in s	592,00	443,50	645,00	386,00
Drittes Quartil in s	1440,00	488,00	1080,00	415,00

Tabelle 17: Deskriptive Statistik der Kommissionierzeiten mit Pick-by-Light und -Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

	Pick-by-Light	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	21	21
Arithmetisches Mittel in s	484,00	398,29
Standardabweichung in s	171,06	120,78
Spannweite in s	580	369
Minimum in s	175	186
Maximum in s	755	555
Erstes Quartil in s	326,00	320,00
Median in s	488,00	415,00
Drittes Quartil in s	619,00	492,00

*Tabelle 18: Deskriptive Statistik der Kommissionierfehlerrate (in %) mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen*

	Pick-by-Paper	Pick-by-Light	Pick-by-Voice	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	6	6	6	6
Arithmetisches Mittel in %	60	35	33	3
Standardabweichung in %	74	49	48	7
Spannweite in %	189	130	114	18
Minimum in %	4	0	0	0
Maximum in %	193	130	114	18
Erstes Quartil in %	11	7	0	0
Median in %	27	16	7	0
Drittes Quartil in %	100	36	71	0

*Tabelle 19: Deskriptive Statistik der Kommissionierfehlerrate (in %) mit Pick-by-Light und Pick-by-Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen*

	Pick-by-Light	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	21	21
Arithmetisches Mittel in %	27	3
Standardabweichung in %	30	6
Spannweite in %	130	21
Minimum in %	0	0
Maximum in %	130	21
Erstes Quartil in %	14	0
Median in %	18	0
Drittes Quartil in %	29	4

Tabelle 20: Deskriptive Statistik der Subjektiven Beanspruchung mit allen vier Arten der Informationsbereitstellung bei sechs Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

	Pick-by-Paper	Pick-by-Light	Pick-by-Voice	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	6	6	6	6
Arithmetisches Mittel	2,28	0,44	1,47	0,25
Standardabweichung	0,34	0,34	0,25	0,23
Spannweite	0,83	0,83	0,67	0,50
Minimum	1,83	0,00	1,17	0,00
Maximum	2,67	0,83	1,83	0,50
Erstes Quartil	2,00	0,17	1,33	0,00
Median	2,25	0,42	1,42	0,25
Drittes Quartil	2,67	0,83	1,67	0,50

Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Subjektiven Beanspruchung mit Pick-by-Light und -Projection bei 21 Versuchsteilnehmern im Zuge der Hauptstudie mit leistungsgeminderten Menschen

	Pick-by-Light	Pick-by-Projection
Versuchsteilnehmer	21	21
Arithmetisches Mittel	0,53	0,38
Standardabweichung	0,36	0,25
Spannweite	1,00	0,83
Minimum	0,00	0,00
Maximum	1,00	0,83
Erstes Quartil	0,17	0,17
Median	0,50	0,50
Drittes Quartil	0,83	0,50